



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## MULTIFUNKČNÍ MODULÁRNÍ 3D FDM TISKÁRNA

MULTIFUNCTIONAL MODULAR FDM 3D PRINTER

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Indra

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Jaššo

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Zdeněk Indra

**ID:** 197642

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Multifunkční modulární 3D FDM tiskárna

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte literaturu zabývající se CNC stroji a 3D tiskem se zaměřením na tiskárny FDM.

Popište základní kinematiku, mechaniku a složení CNC strojů se zaměřením na 3D tiskárny.

Navrhněte a odůvodněte mechanickou konstrukci, hardwarové a softwarové řešení.

Sestrojte a otestujte Vámi navrženou 3D FDM tiskárnu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 30.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Kamil Jaššo

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá problematikou 3D tiskáren, jejich rozdělení dle principu funkce a jejich konstrukcí. U FDM tiskáren jsou kromě tiskových materiálů uvedeny druhy pohybových systémů použitelných pro FDM 3D tisk a je diskutována možnost konverze 3D tiskárny na jiné CNC zařízení. Tato teorie je poté vyhodnocována, jsou vybírány nejvhodnější díly pro modulární CNC zařízení a následně je zařízení zkonstruováno a otestováno v konfiguraci FDM 3D tiskárny.

## **Klíčová slova**

3D tisk, 3D tiskárna, FDM, CNC, prototyp

## **Abstract**

This work deals with problems of 3D printers, their types according to function principle and their design. In addition to print materials, FDM printers chapter includes the types of motion systems available for FDM 3D printing, and the possibility of converting 3D printers to other CNC devices is discussed. This theory is then evaluated and the most suitable parts are used to build modular CNC machine which is then tested in configuration of FDM 3D printer.

## **Keywords**

3D printing, 3D printer, FDM, CNC, prototype

## **Bibliografická citace**

INDRA, Zdeněk. *Multifunkční modulární 3D FDM tiskárna* [online].  
Brno, 2019 [cit. 2019-05-30].

Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119588>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Kamil Jaššo.

# Obsah

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Historie a vznik 3D tisku.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Projekt RepRap.....</b>	<b>12</b>
<b>3. Typy 3D tiskáren.....</b>	<b>14</b>
3.1 FDM tiskárny .....	14
3.2 SLA tiskárny .....	16
3.3 Ostatní 3D tiskárny .....	18
<b>4. Materiály pro FDM 3D tisk .....</b>	<b>19</b>
4.1 Kyselina polymléčná (PLA).....	20
4.2 Akrylonitril-butadien-styren (ABS) .....	20
4.3 Polyethyléntereftalát (PET, PET-G, PET-G/CF) .....	21
4.4 Nylon (PA) .....	21
4.5 Specializované materiály pro FDM .....	22
<b>5. Konstrukce FDM 3D tiskáren.....</b>	<b>23</b>
5.1 Elektronika FDM 3D tiskáren.....	25
5.2 Software a firmware FDM tiskáren.....	27
5.3 Modifikace FDM 3D tiskáren .....	29
<b>6. MODULÁRNÍ 3D FDM TISKÁRNA.....</b>	<b>30</b>
6.1 Mechanická konstrukce.....	32
6.2 Elektronika .....	38
6.3 Firmware .....	41
6.4 Testovací tisk .....	42
<b>7. Závěr .....</b>	<b>48</b>

## Seznam zkratek

DLP	– Digital Light Processing
FDM	– Fused deposition modeling
FFF	– Fused filament fabrication
RAMPS	– RepRap Arduino Mega Pololu shield
RAMBO	– RepRap Arduino Mega compatible mother board
SLA	– Stereolitografie
SLS	– Selective laser sintering
SLM	– Selective laser melting

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - Příklady desek</i> .....	25
<i>Tabulka 2 - Přehled driverů firmy Trinamic</i> .....	26
<i>Tabulka 3 - Rozpočet projektu</i> .....	30
<i>Tabulka 4 - Přehled použitých motorů</i> .....	39
<i>Tabulka 5 - Výsledky testu rychlosti tisku</i> .....	46

## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 - Počty ročně prodaných tiskáren s cenou pod 100 000Kč [1]</i> .....	10
<i>Obrázek 2 - Tiskárna SLA-1[2]</i> .....	12
<i>Obrázek 3 - RepRap tiskárna Mendel [4]</i> .....	13
<i>Obrázek 4 - RepRap tiskárna Darwin [4]</i> .....	13
<i>Obrázek 5 - Princip funkce tisku FDM [5]</i> .....	14
<i>Obrázek 6 - FDM tiskárna Průša i3 Mk3[6]</i> .....	15
<i>Obrázek 7 - Princip tisku SLA , DLP a MSLA [7]</i> .....	16
<i>Obrázek 8 - Princip tisku SLS [8]</i> .....	18
<i>Obrázek 9 - ukázka filamentů značky Fillamentum</i> .....	19
<i>Obrázek 10 - Pohybový systém CoreXY [10]</i> .....	23
<i>Obrázek 11 - Ukázka G-kódu generovaného ve sliceru Slic3r</i> .....	28

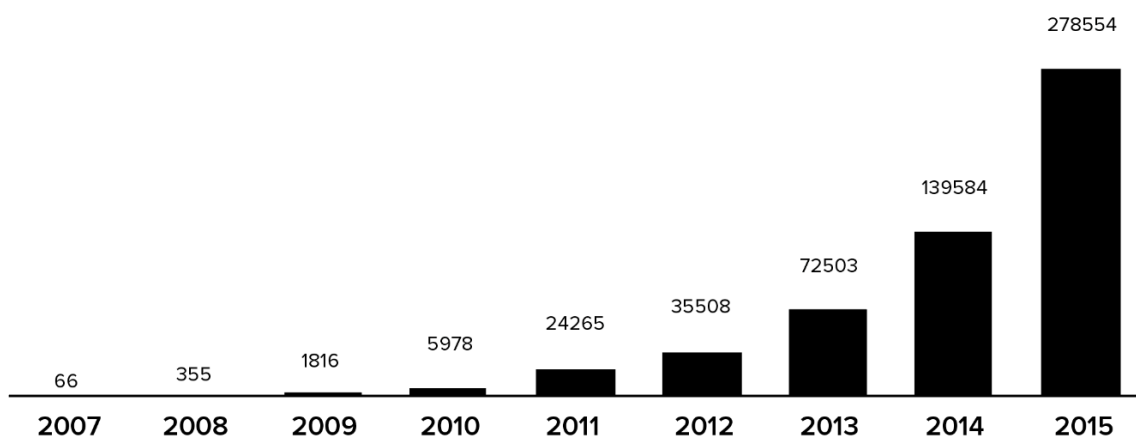
<i>Obrázek 12 - Bezrámová 3D tiskárna Hangprinter [4]</i> .....	29
<i>Obrázek 13 - Modifikovatelná 3D FDM tiskárna</i> .....	31
<i>Obrázek 14 - Zjednodušený návrh zařízení</i> .....	32
<i>Obrázek 15 - Realizace osy X a Y</i> .....	34
<i>Obrázek 16 - Přípravky pro správné umístění kolejnic</i> .....	35
<i>Obrázek 17 - Řešení posuvu osy Z</i> .....	35
<i>Obrázek 18 - Tisknuté díly z plastu PETG</i> .....	36
<i>Obrázek 19 - Odnímatelná tisková hlava</i> .....	37
<i>Obrázek 20 - Nainstalovaná tisková hlava</i> .....	37
<i>Obrázek 21 - Desky RAMPS 1.6+, Re-ARM a drivery</i> .....	38
<i>Obrázek 22 - Rozložení vývodů konektoru CAN 15</i> .....	40
<i>Obrázek 23 - Ukázka konfiguračního prostředí Marlin</i> .....	41
<i>Obrázek 24 - Kontola teploty podložky termokamerou</i> .....	42
<i>Obrázek 25 - Horizontální defekty na výtisku</i> .....	43
<i>Obrázek 26 - Samocentrovací spojka</i> .....	44
<i>Obrázek 27 - Nevhodná spojka</i> .....	44
<i>Obrázek 28 - Tisk spojek</i> .....	44
<i>Obrázek 29 - První kostka na testování rychlosti</i> .....	45
<i>Obrázek 30 - Kostky z testu vlivu rychlosti na přesnost</i> .....	46
<i>Obrázek 31 - Model letadlové lodi tisknut při 120 mm/s</i> .....	47

# ÚVOD

3D tisk je technologie výroby předmětů aditivním nanášením vrstev materiálu. Tedy na místo klasického CNC obrábění, kde se opracovává surovina do požadovaného tvaru, nebo vstřikování do forem, se zde vrší tiskový materiál na sebe a tvoří pevné struktury. Tímto způsobem vzniká reálná kopie virtuálního 3D modelu.

Tato metoda má výhodu nízkých provozních nákladů hlavně pro malé výrobní série a prototypové výroby. Pro velkosériovou produkci jsou stále více vhodné obráběcí procesy, lisování a odlévání. Také rychlost procesu od návrhu modelu po hotový výrobek je zde snížena, neboť se v tomto případě nemusí připravovat formy pro plastové odlitky, nebo nástroje pro opracování. Samotný proces tisku ale bývá pomalejší, než uvedené a stále převažující formy získávání výrobku. U větších výtisků může výroba trvat i několik dní. Neustále zdokonalující se technologie 3D tisku se však v současnosti rychle rozšiřuje a mnohdy se stává dostupnější a levnější variantou zejména v oblasti vývoje prototypů a malosériových výrob.

Dostupnost je na takové úrovni, že cena malých stolních 3D tiskáren vyrábějících plastové díly je srovnatelná s kancelářskými tiskárnami na papír. Jen v roce 2015 bylo prodáno více než 278 000 tiskáren s cenou pod 100 000 Kč (viz. *Obrázek 1*). Počet levných tiskáren se oproti každému předešlému roku zdvojnásoboval a tento trend nadále rychle roste.[1]



*Obrázek 1 - Počty ročně prodaných tiskáren s cenou pod 100 000Kč [1]*



# 1. HISTORIE A VZNIK 3D TISKU

Hlavně díky mediální pozornosti k tomuto tématu a díky velmi rychlému vývoji a pokroku je 3D tisk častou formou rychlé a levné výroby fyzických předmětů i v domácím prostředí. Historie 3D tisku je ale v kontrastu s ostatními technologiemi poměrně krátká.

Prvním náznakem nadcházející technologie byla práce doktora Hideo Kodamy v roce 1980. Cílem jeho práce bylo vyvinout rychlejší výrobní metodu prototypů. Projekt však nebyl dostatečně financován, dokumentován a nepodařilo se získat podaný patent. Zavedl ale dodnes užívané pojmy jako rapid prototyping (rychlá výroba prototypů) a SLA, což je proces vytvrzování tekutých fotopolymerů pomocí UV laseru.

O podobný koncept se v letech 1984 až 1986 pokusil tým francouzských inženýrů ve složení Jean-Claude André Alain le Méhauté a Olivier de Witte. Podařilo se sestrojít prototyp a v červenci 1984 byl podán patent pro SLA metodu tisku. V roce 1986 byl patent udělen, projekt byl ale označen investory jako neperspektivní a byl opuštěn.

Ve stejném období v USA, Charles W. Hull pracoval na svém projektu SLA 3D tiskárny pro realizaci výrobního procesu rapid prototyping. Pouhé tři týdny po francouzském týmu v roce 1984 předal svůj návrh patentu. Byl uznán jako US4575330A "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography" 11. března, 1986. S tímto úspěchem ještě ve stejném roce založil firmu 3D Systems považovanou za první firmu s tímto zájmem. Pod touto značkou byla vydána 3D tiskárna s názvem SLA-1, která byla v prodeji od roku 1987. [2]

SLA však nebyla jedinou vznikající technologií 3D tisku. Carl Decard, student University of Texas, získal patent pro metodou tisku SLS. Využívalo se různých materiálů ve formě jemných prášků, typicky ale nylonu, který byl selektivně spékán pohyblivým laserem do pevné struktury. Pouze rok po patentu SLA přišel Decard se svým patentem pro SLS a v roce 2001 bylo vlastnictví patentu prodáno výše zmiňované společnosti 3D Systems.

V roce 1989 vznikla i FDM technologie tisku, která je dnes nejvyužívanější. Strojní inženýr S. Scott Crump v domácích podmínkách upravil CNC frézku k dispenzi lepidla, které nanešeno ve vrstvách tvořilo trojrozměrné modely. Tento princip zdokonalil, lepidlo bylo nahrazeno termoplasty přetavovanými žhavenou tryskou, a v roce 1989 byl podán patent US5121329A pro FDM technologii 3D tisku. V roce 1992 na trh přišla první FDM 3D tiskárna a Scott Crump založil společnost Stratasys, první firmu prodávající FDM 3D tiskárny. [3]



*Obrázek 2 - Tiskárna SLA-1[2]*

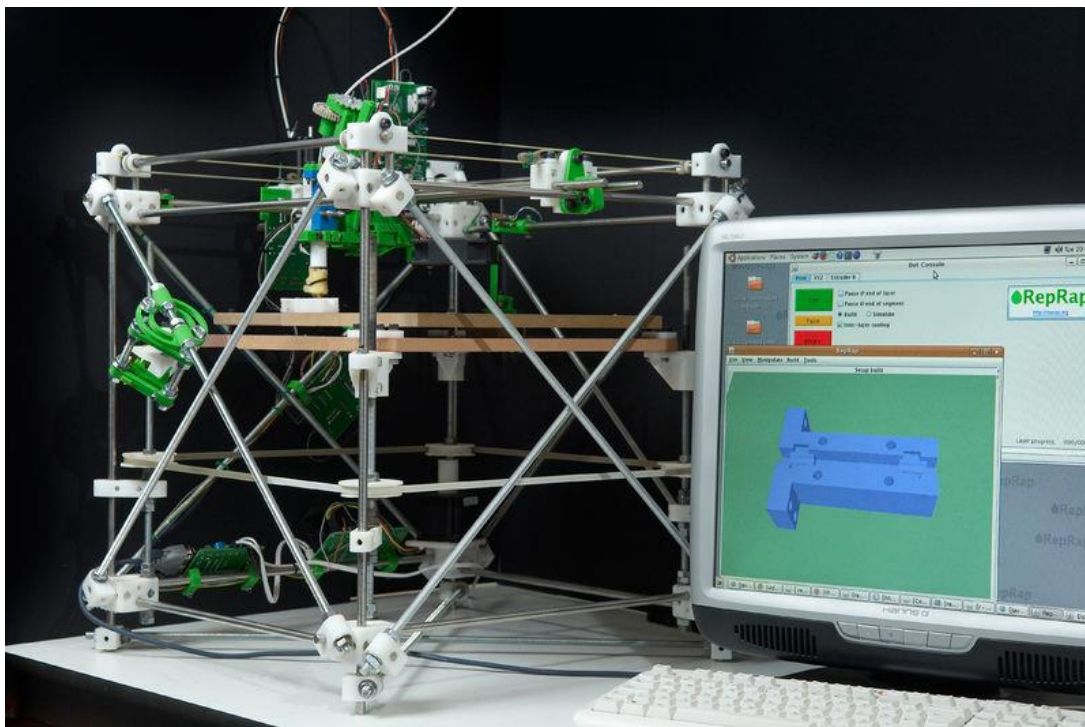
## 2. PROJEKT REPRAP

Během jedné dekády tedy byly vynalezeny hned tři technologie 3D tisku. Tyto tiskárny ale byly zaměřeny hlavně na průmyslové aplikace. Opravdové expanze se 3D tiskárny dočkaly až od roku 2005, kdy doktor Adrian Bowyer založil projekt RepRap.

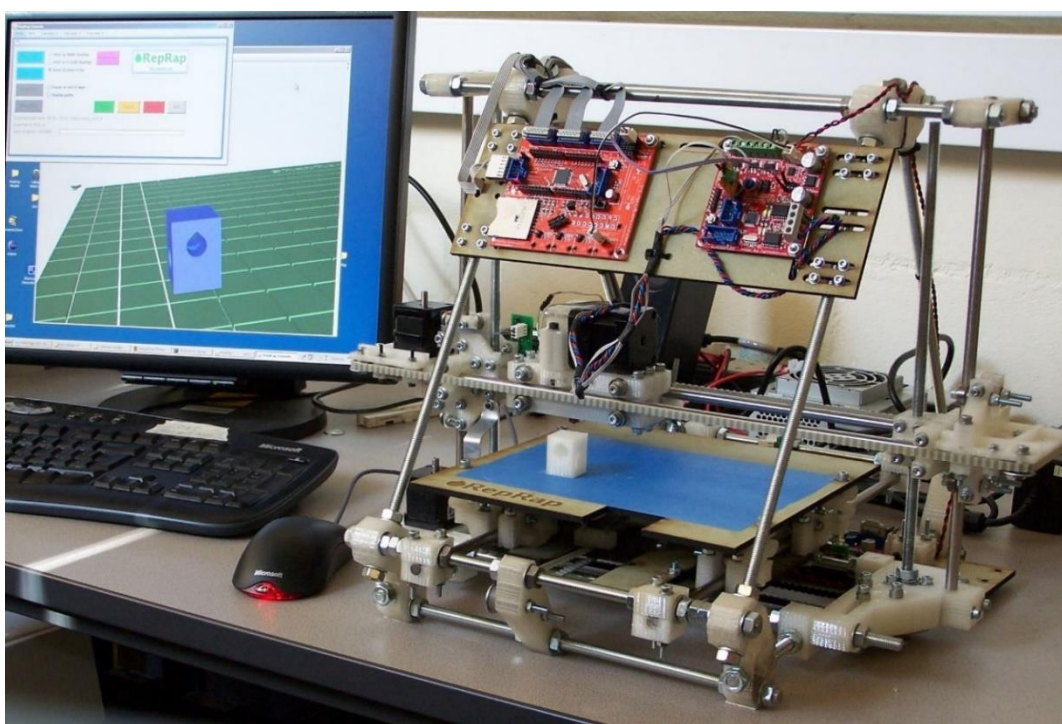
Šlo o snahu vyvinout open-source (open-source – zdarma a pro všechny dostupná dokumentace bez autorských práv) platformu FDM 3D tiskáren, co by byly schopné replikace vlastních dílů. Tím by se značně snížily náklady na výrobu dalších tiskáren a počet zařízení by se začal rychle zvyšovat. Prvními zástupci RepRap tiskáren byly RepRap Darwin a později jeho evoluce RepRap Mendel.

Pro zachování minimálních nákladů se rámy těchto tiskáren skládaly ze závitových tyčí spojených tisknutými díly a pro elektroniku se využívalo open-source vývojových platforem, jako například Arduino. Tiskárny postupně nabývaly formy lehce modifikovatelných stavebnic.

RepRap byl zprvu projektem pouze anglické University of Bath, ale díky veřejně dostupným dokumentacím a končící platností patentu Scotta Crumpa, se projekt RepRap volně rozšířil po světě v podobě levných stolních FDM 3D tiskáren. Tato expanze pak dala vzniku řadě dalších firem a jednotlivých entuziastů v oboru. [4]



Obrázek 4 - RepRap tiskárna Darwin [4]



Obrázek 3 - RepRap tiskárna Mendel [4]

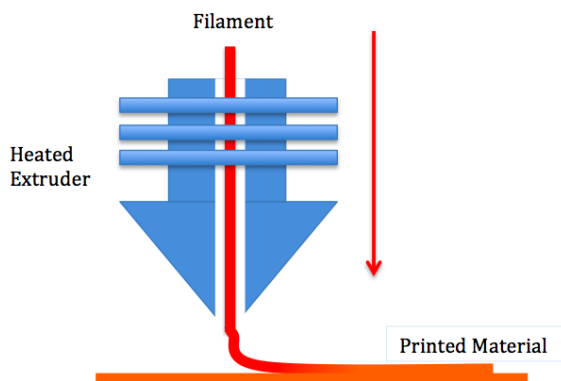
### 3. TYPY 3D TISKÁREN

Zařízení schopná tisku trojrozměrných objektů jsou obecně nazývána 3D tiskárny. U většiny těchto tiskáren probíhá tisk modelu ve třech osách a tedy X, Y a Z. Z je vertikální osa, v jejíž rovině se vrší jednotlivé vrstvy. Roviny X a Y pak určují tvar vrstvy. Samotná funkce tiskárny úzce závisí na používaných materiálech pro tisk.

#### 3.1 FDM tiskárny

FDM, nebo také FFF. Rozdílné názvy jsou zapříčiněny různými patenty od různých firem, které začaly vznikat v roce 2009 po skončení platnosti originálního patentu FDM. Však principově jsou metody popsané patenty stejné. Jedná se o druh 3D tiskárny, jejíž základním principem je nanesení tiskového materiálu na podložku a po dokončení celé této vrstvy se zvedne pracovní rovina o nastavenou výšku. Na hotovou vrstvu pak tiskárna natiskne novou. Takto se spojují jednotlivé vrstvy na sebe, dokud se nenavrší celý model.

Samotný tisk je způsoben protlačením plastové struny, takzvaného filamentu horkou tryskou, kde se roztaví a vyteče z trysky ven druhou stranou. Roztavený materiál se po natisknutí ihned ochladí a opět ztuhne do původní pevnosti, spojen s předchozí vrstvou. Průměr vyústění žhavené trysky se pohybuje od 0,1 do 0,6 mm pro běžná použití. Velikost trysky je zároveň hlavním faktorem určujícím, jak malé detaily bude tiskárna schopna vytisknout. Teplota tisku silně závisí na tisknutém materiálu, ale nastavitelná teplota se u FDM tiskáren pohybuje se v rozmezí od 150 do 300 °C. Některým filamentům bude věnována kapitola Materiály pro FDM 3D tisk na straně 19.



Obrázek 5 – Princip funkce tisku FDM [5]

Tato technologie má ale svá omezení. Problémem mohou být například převisy na modelu, kde by se mohlo stát, že tryska bude tisknout mimo obrys předchozí vrstvy a model se nereplikuje správně podle předlohy. U převisů totiž není dostatečná podpora nových vrstev ze spodní strany a natavený filament by jednoduše spadl na podložku bez zachycení na modelu. V těchto případech se musí softwarově na modelu vytvořit

přídavné podpěry na místa s rizikem přepadu filamentu přes okraj předešlé vrstvy. Tyto podpory se pak z hotového modelu odstraní.

Hlavní výhodou FDM 3D tiskáren je nízká pořizovací cena, malé náklady na provoz a celková dostupnost. Například oblíbená česká tiskárna Průša i3 nepřesahuje cenovku 20 000Kč. Nevýhodami FDM jsou dlouhá doba samotného tisku objektu. FDM také nejsou schopny tisknout drobné detaily pod desetiny milimetru a nedosahují velké tvarové přesnosti. Také není možné vytisknout jakýkoli tvar a některé celistvé modely se pak musí dělit na několik částí, aby je bylo možné FDM technologií realizovat. Výtisky z těchto tiskáren mají ale široké uplatnění prakticky kdekoli, kde je potřeba rychle a levně vyrobit prototypový model, náhradní díl, předměty běžné denní potřeby, zkrátka všude kde není potřeba precizních rozměrů a náročných materiálů. FDM 3D tisk se také využívá v modelářství, architektuře a například v bytovém designu. [5]



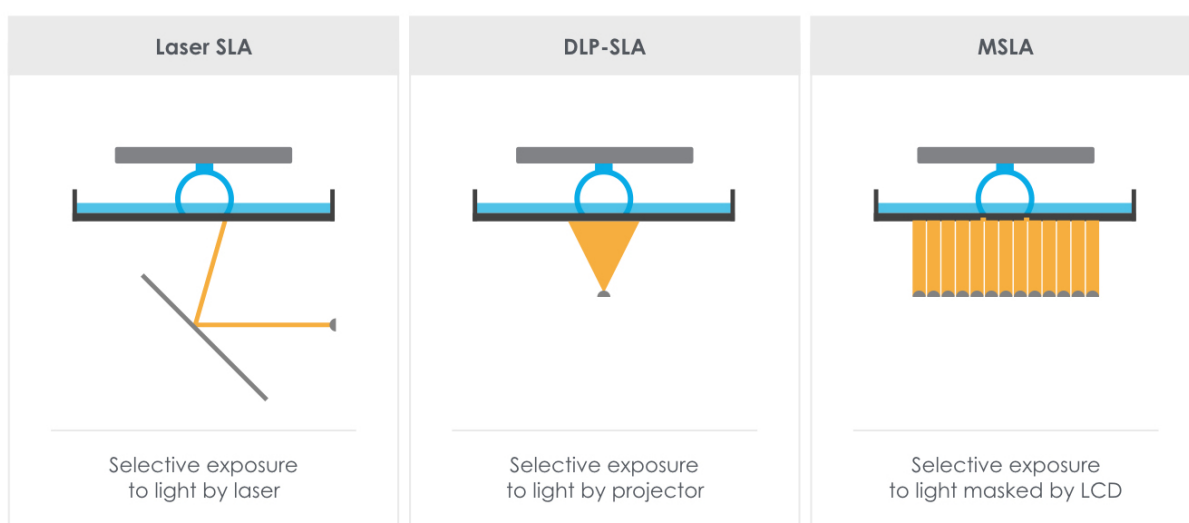
*Obrázek 6 – FDM tiskárna Průša i3 Mk3[6]*



## 3.2 SLA tiskárny

SLA (stereo litografie) - je nejstarší technologií 3D tisku. Využívá se zde tekutých fotocitlivých polymerů a pryskyřic, které po vystavení světlu o určité vlnové délce tuhnou. Nejčastěji tomu bývá v UV spektru 370 – 410 nm, existují ale materiály reagující v širším světelném spektru.

V průhledné nádobě je do tekutého tiskového materiálu shora ponořena platforma (vertikální osa Z), na kterou laser skrze nádobu vykreslí obraz. Na tiskové platformě se z osvětlené pryskyřice vytvrdí příslušný tvar, osa Z se s platformou posune o vrstvu výše, tedy vynoří se a proces se opakuje. Konfigurace může být i obrácená. Tisková plocha se noří do pryskyřice a laser osvětluje platformu shora skrze hladinu.



Obrázek 7 - Princip tisku SLA , DLP a MSLA [7]

Z SLA tiskárny vychází i další typy tiskáren využívajících fotopolymerů jako tiskového materiálu. Jednotlivé typy se liší způsobem osvětlování. Zatímco laserová metoda využívá jednoho přesně ostřeného laserového bodu, u DLP-SLA tisku je zdrojem světla projektor (zkráceně DLP). Projektor v bílé barvě zobrazuje požadovaný tvar a okolí tvaru je černé. Bílé osvětlená místa fotopolymeru tuhnou, po nastavené době expozice se posune osa Z a začne se s vytvářením nové vrstvy. Právě tato metoda tisku z fotopolymeru vyžaduje materiál reagující na širší světelné spektrum.

Nejnovější a nejlevnější metodou je MSLA, kde je ze spodní strany dna průhledné nádoby s tiskovým materiálem umístěna LCD obrazovka s vysokým rozlišením. LCD má odstraněnou zadní reflexivní vrstvu, takže slouží jako prostupné proměnné stínítko, skrze které svítí silný zdroj UV světla, nejčastěji výkonné UV LED moduly. Tam, kde je na LCD zobrazen bílý tvar, UV světlo projde skrz a osvítí fotopolymer. Zobrazení černé na LCD panelu způsobí zablokování cesty UV světla.

Výhodou těchto metod tisku je možnost vyrobit menší a přesnější modely, než u FDM a SLS. Zejména pak u SLA metody. SLA totiž pohybuje malým laserovým bodem plynule s vysokým rozlišením, tedy bez přechodů, a výtisky SLA tiskáren mají

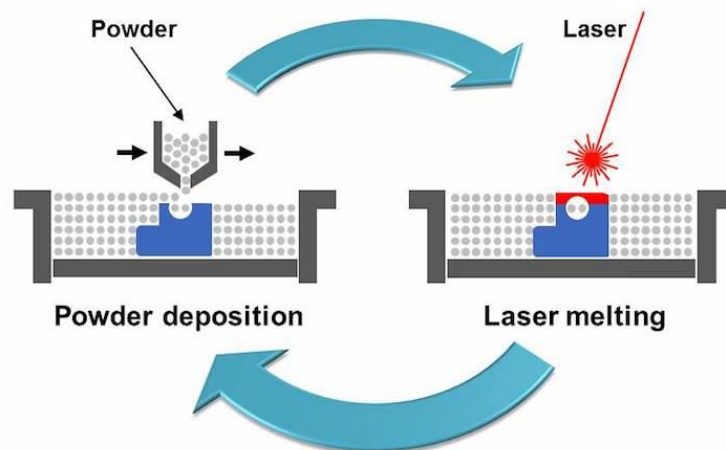
nejkvalitnější povrch ze všech metod. DLP a MSLA spoléhají na rozlišení projektoru, či LCD a hustota pixelů se projeví viditelným stupňováním dle pixelů na zaoblených hranách modelu. Tiskové polymery jsou zhruba dvakrát dražší, než plastové struny pro FDM a po tisku je u těchto metod nutné modely vytvrdit další expozicí UV zářením. Je také možné si vybrat různé tvrdosti a barvy výsledného polymeru.

Jelikož se jedná spíše o precizní a nákladnou metodu, tisk vytvrzováním fotopolymerů se používá hlavně pro výrobu malých přesných prototypů v průmyslu a výzkumu, ale například i pro výrobu modelů ve zdravotnictví. [7]

### 3.3 Ostatní 3D tiskárny

Tiskárny pracující s plastovou strunou, nebo fotopolymérem bývají většinou dostupné jako stolní, neboli desktopové. To ale značně omezuje velikost tisknutelného modelu, a tak existují i průmyslové varianty s větší tiskovou plochou. Pro průmyslovou výrobu se ale častěji používají například tiskárny SLS a SLM, které fungují na principu přetavení (SLM), či spékání (SLS) jemného prášku laserem do pevné struktury. Laser se pohybuje v osách X a Y. Po přetavení prášku v celé vrstvě klesne tisková plocha v ose Z o danou výšku, přes dokončenou vrstvu se roznese nový nános čerstvého prášku a opět se přetaví, nebo speče laserem. Hotový celistvý model je ve výsledku celý zasypán v tiskovém materiálu a před vyjmutím výrobku se prášek z tiskárny vysává. Vysátý očistěný materiál je znovu použitelný pro další tisk. [8]

Tímto způsobem lze tisknout v podstatě jakýkoli spékateľný materiál ve formě prášku, na který bude dostačovat výkon laseru daného modelu tiskárny. Mohou se tisknout termoplasty jako např. ABS a Nylon, ale převážná většina SLM tiskáren se využívá v průmyslu hlavně pro schopnost zpracovat práškové kovy jako ocel, hliník, ale i titan. Je tedy možné tisknout i kovové součásti. V oblasti strojírenství se SLM tiskárny využívají například pro tisk částí raketových motorů, kde jednoduše vytisknuté díly je velmi složité vyrobit obráběním a odléváním. Takový díl je vyhotoven v jednom kuse, nevznikají tedy takové strukturální slabiny jako sváry a další spoje a výroba je levnější.



Obrázek 8 - Princip tisku SLS [8]

Obdobným způsobem pracují tiskárny na principu vstřikování pojiva, anglicky Binder Jetting. Místo laseru je na pracovní hlavě soustava trysek, ze kterých vytéká pojivo slepující prášek. Různými barvami pojiva se dá dosáhnout i vícebarevného výtisku. Touto metodou lze tisknout různé kovy, plasty ale i keramiku.

Nejmodernější práškové tiskárny jsou řešeny pomocí univerzálních robotických průmyslových ramen, na jejichž pracovním konci se nachází tryska, skrze kterou se pod vysokou teplotou i tlakem vystřikuje paprsek roztaveného kovu, či jiného tavitelného materiálu. Roztavený materiál se jednoduše ve vrstvách usazuje na sebe a poté chladne.



## 4. MATERIÁLY PRO FDM 3D TISK

Tiskové materiály pro FDM jsou různé a jejich výběr se stále rozšiřuje. Ale k nejpoužívanějším patří ekologicky odbouratelný plast PLA, známý ABS, PET, nebo také Nylon. Existují i speciální filameny obsahující dřevěné, či kovové částice, vodivé filameny, nebo filameny zpevněné karbonovými vlákny.

Zmiňované filameny jsou většinou dodávány jako plastické struny o průměru 2,85 mm nebo 1,75 mm namotané na špulce. Struny 2,85mm jsou vývojově starší a jsou u menších stolních tiskáren postupně nahrazovány strunami 1,75mm. Většina výrobců ale stále dodává obě verze. Běžná prodávaná množství jsou 0,75 kg a 1 kg. Někteří výrobci dodávají i 2 a 5 kg balení. Cena za běžně používané materiály (ABS, PLA, PET) se pohybuje kolem 600 Kč za kg v závislosti na výrobcu a materiálu. Speciální materiály mohou však dosahovat ceny i několika tisíců korun za kg.



Obrázek 9 - ukázka filamentů značky Filamentum

## 4.1 Kyselina polyléčná (PLA)

Doporučená teplota tisku: 185 – 235 °C + podložka 0 - 60°C (není nutná)

Hustota: 1250 kg/m<sup>3</sup>

Jedná se o biologicky plně odbouratelný materiál vyráběný z kukuřičného či bramborového škrobu. Ze všech materiálů pro FDM je PLA nejpoužívanějším. Vyznačuje se jednoduchým tiskem díky jeho malé tepelné roztažnosti a nenáročnosti na tiskárnu. Nevyžaduje vyhřívanou tiskovou podložku jako ostatní plasty pro FDM. Teplota tisku PLA se pohybuje v rozmezí od 150 °C po 210 °C. Výtisky jsou tvrdé a tuhé. Oproti ostatním používaným materiálům však postrádá pružnosti a je křehký. Také jeho teplotní odolnost není tak vysoká jako třeba u ABS. PLA má tendenci měknout a ztrácet tvar již při 60°C. Není tedy vhodné používat PLA u zdrojů tepelného záření, nebo jako materiál pro namáhané konstrukční díly.

Využívá se tedy pro nenáročné, spíše statické aplikace jako ukázkové prototypy, modely a díly s malými nároky na materiál. Díky širokému sortimentu barev a typů je PLA využíváno i jako materiál pro výrobky v bytovém designu či módě.

Výsledné výtisky je možné lakovat, ale PLA je obtížné kvůli jeho tvrdosti a nízkému bodu měknutí opracovávat či brousit. PLA je rozpustné v hydroxidu sodném.[9]

## 4.2 Akrylonitril-butadien-styren (ABS)

Doporučená teplota tisku: 220 – 240 °C + podložka 100 – 130°C

Hustota: 1050 kg/m<sup>3</sup>

ABS je známý průmyslový plast odolný proti mechanickému poškození a velkým teplotním výkyvům. Je houževnatý, pružný a velmi lehce opracovatelný. Dříve byl pro FDM tisk hojně využíván hlavně kvůli dostupnosti a nízké ceně. Výtisky jsou vzhledově i pevnostně na dobré úrovni. Ačkoli je hotový výtisk z ABS zdravotně nezávadný, při jeho tavení a tisku vzniká škodlivý zápach obsahující kyanovodík. Navíc vyžaduje vysokou tiskovou teplotu až 240 °C a je nutné, aby byla tiskárna opatřena vyhřívanou tiskovou podložkou, jelikož ABS disponuje velkou teplotní roztažností. Je tedy složitější tisknout velké díly z ABS jelikož se plast při chladnutí smrští a může se odlepit od tiskové podložky. Zamezuje se tím uzavřením tiskárny do teplotně stabilního boxu a vyhříváním tiskové podložky až na 130 °C, aby tisknutý model rychle nevychládl a nesmrštil se při tisku. Přes mechanické kvality tohoto plastu se od tisku z ABS postupně upouští. Zejména kvůli jeho náročnosti na tiskárnu a zdravotním rizikům při tisku. Povrch ABS výtisků je možné zahladit naleptáním povrchu modelu výpary acetonu a dosáhne se tak lesklé povrchové úpravy. ABS není vhodný na venkovní aplikace, jelikož degraduje po vystavení UV záření, ale stále poskytuje široké uplatnění od výroby drobných předmětů po velké mechanicky namáhané díly. [9]

### 4.3 Polyetyléntereftalát (PET, PET-G, PET-G/CF)

Doporučená teplota tisku: 220 – 260 °C + podložka 45 – 60°C

Hustota: 1350 kg/m<sup>3</sup>

PET (polyetyléntereftalát) je známý hlavně jako materiál plastových lahví. Díky jeho dobrým mechanickým vlastnostem a snadnému, nezávadnému tisku postupně nahrazuje ABS a stává se univerzálním materiálem pro FDM. Disponuje poměrně velkou tvrdostí a pevností. Samotný tisk i výsledný model jsou zdravotně nezávadné. Vizuální kvalita výtisků je ale horší, než u předešlých filamentů. Roztavený PET má tendence lepit a táhnout se za tryskou. Jeho teplotní roztažnost je menší než u ABS a je možné tisknout i velké díly. Doporučuje se ale použití vyhřívané tiskové podložky s teplotou 45 - 60°C. PET nedegraduje a je tedy vhodný pro použití ve venkovních aplikacích. Nejčastěji je používán pro konstrukční mechanické a pohyblivé díly. Je proto nejčastějším plastem používaným na samotné díly 3D tiskáren. Materiál je lehce opracovatelný a brousitelný. PET-G (polyetyléntereftalát – glykol) je mechanicky, teplotně a chemicky odolnější verze.

PET-G/CF je materiál doplněný o uhlíková vlákna pro zvýšení tuhosti. [9]

### 4.4 Nylon (PA)

Doporučená teplota tisku: 235 – 260 °C + podložka 100 - 130°C

Hustota: 1100 kg/m<sup>3</sup>

Velmi odolný materiál s nízkým součinitelem tření a vysokou teplotou tání. Tvoří lesklé a hladké povrchy výtisků. V malých vrstvách je spíše flexibilní, velké modely pak mají velkou pevnost v tahu a pružnost. Vhodný je zejména pro tisk funkčních mechanických dílů a namáhaných částí. Pro tisk vyžaduje teploty podobné ABS a jeho cena je vyšší než u předchozích materiálů. Nylon je také velmi citlivý na vzdušnou vlhkost a snadno ji pohlcuje. Před tiskem je tedy nutné nylon sušit, jinak vlhkost ve filamentu způsobí bublinky ve výtisku a oslabí strukturu modelu. [9]

## 4.5 Specializované materiály pro FDM

**Imitační filamenty** – Imitační filamenty jsou vyrobeny tak, aby vzhledově a vlastnostmi připomínaly jiný materiál jako je např. dřevo či kov. Názvy těchto materiálů se různí podle výrobce. Nejznámějšími jsou ale výrazy Woodfill, Bamboofill (příměs bambusu), Copperfill (příměs mědi), atd.

Základem bývá PLA (80 %), do kterého je vmíchán například dřevěný či kovový prášek (20 %). Výsledné výtisky jsou pak opracovatelné leštěním či broušením, podobně jako imitované materiály. Při tisku těchto filamentů je ale nutné počítat s abrazivními vlastnostmi a velikostí částec v PLA. Klasické mosazné trysky s průměrem do 0.4 mm nejsou vhodné. Doporučuje se použití tvrzených trysek s průměrem od 0.6 mm.

**Vodivé a magnetické filamenty** – stejným způsobem jako imitační materiály jsou tvořeny i filamenty se speciálními vlastnostmi. Například vodivý, nebo magnetický filament se základem PLA. Příměsí jsou v tomto případě uhlík a různé kovy. Jejich mechanické vlastnosti a přilnavost ve vrstvách jsou ale horší kvůli většímu obsahu prášků.

**Rozpustné filamenty** – Využívané zejména pro tisk podpor. Podpory tvořené ze stejného materiálů, jako samotný výtisk, často bývají těžko odstranitelné a jejich zbytky jsou nevzhledné, či překáží v otvorech atd. Podpory se mohou tedy tisknout z materiálu, který se rozpuštěním například ve vodě odstraní beze zbytku. Pro takový tisk je ale potřeba disponovat tiskárnou s dvěma tiskovými tryskami nebo s jednou tryskou schopnou zpracovávat dva různé materiály během jednoho tisku.

Příkladem tohoto materiálu je např. BVOH (Butenediol vinylalkoholový kopolymer) rozpustný ve vodě.

Příklady ostatních speciálních materiálů:

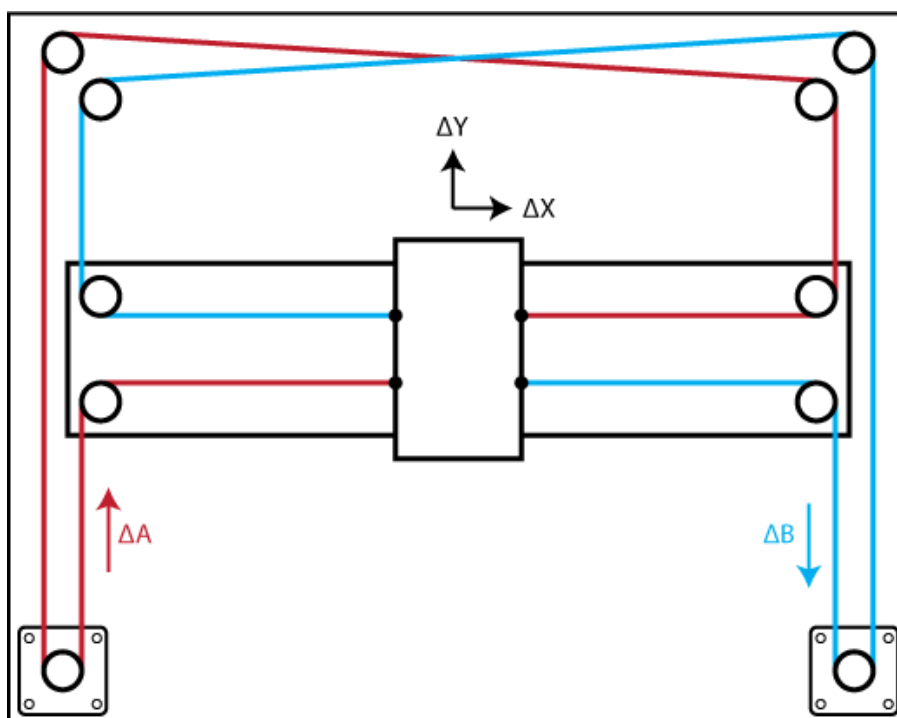
**Plaster** – Materiál imitující strukturu a barvu sádry, vhodný pro architekturu a design.

**3DXNANO ESD** – Vodivý materiál s obsahem uhlíkových nanotrubiček. Vhodný pro díly splňující ESD ochranu, stíněné krabičky...

**Flex** – Flexibilní materiály připomínající gumu, poměrně obtížný tisk kvůli poddajnosti tiskové struny. Prodává se v různých tvrdostech.

## 5. KONSTRUKCE FDM 3D TISKÁREN

Pohybový aparát FDM 3D tiskáren bývá nejčastěji složen podle kartézského souřadnicového systému. Tedy tisková hlava se pohybuje horizontálně v osách X, Y a tisková podložka se posunuje vertikálně nahoru, či dolů v ose Z. Tak tomu je v příkladu tiskárny RepRap Darwin a u dalších tiskáren jako Ultimaker a MakerBot. Dalším řešením může být také posuv tiskové podložky v ose Y, tedy dopředu a dozadu a druhá osa vykonává pohyb horizontálně X a vertikálně Z, jako u RepRap Mendel a jeho iterací jako Průša i3. Speciálním případem jsou tiskárny CoreXY. Ty využívají systém řemenů hnáných statickými motory připevněnými na rámu (viz. Obrázek 11).



Equations of Motion:

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B), \quad \Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B)$$

$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y, \quad \Delta B = \Delta X - \Delta Y$$

Obrázek 10 - Pohybový systém CoreXY [10]

Rotace obou rohových motorů ve stejném směru způsobí horizontální pohyb X. Rozdílná rotace pak pohyb v ose Y. Tento systém má výhodu umístění těžkých motorů na rám, tak je tiskárna schopna dosahovat vyšších rychlostí. Nejrychlejší tiskárny na trhu využívají právě CoreXY systém. Nevýhodou však je, že takový pohyb vyžaduje odpovídající výpočetní výkon pro kalkulaci pohybů. Také jsou zde delší řemeny, takže

při nesprávném napnutí, nebo umístění je zde větší riziko zákmitů hlavy při změně směru, rezonanci řemenu s motorem, atd.

FDM 3D tiskárny mohou být i v provedení deltového robota se třemi paralelními rameny umístěnými kolem statické kruhové tiskové plochy, které se všechny posouvají vertikálním směrem. Různé výšky ramen pak způsobí vychýlení tiskové hlavy do stran. Tyto tiskárny, ačkoli jsou náchylné na přesné mechanické zpracování, jsou obecně rychlejší, než kartézské typy tiskáren díky menšímu množství těžkých pohyblivých komponent. Delta tiskárny ale mají znatelně menší tiskové plochy a podobně jako u CoreXY vyžadují delta tiskárny větší výpočetní výkon řídicí jednotky pro kalkulaci pohybů. [10]

Nejpoužívanější systémy však stále jsou standartního kartézského typu, kde každá osa má svůj motor, se kterým se pohybuje. Takové řešení je jednoduché na ovládání, nevyžaduje speciální propočty a je univerzálně použitelné pro případné konverze tiskárny na jiná CNC zařízení.

Mechanicky jsou pohybové systémy řešeny jako vozíky s lineárními ložisky na pojezdových tyčích, či vozíky na kolejnici a jejich pohyb je zajištěn krokovými motory skrze ozubený řemen. Využívají se i závitové tyče, trapézové šrouby a ojediněle kuličkové šrouby. Samotné části a rám tiskárny mohou mít mnoho podob. Pro rámy se například používá ohýbaných plechů, hliníkových profilů, ale i akrylových desek. Opravdu nízkonákladové rámy tiskáren jsou šroubeny ze závitových tyčí, nebo lepené ze dřeva. Konstrukční prvky tiskárny podobně mohou být od CNC obráběných hliníkových až po tisknuté plastové díly, čehož se hojně využívá pro minimální náklady.

## 5.1 Elektronika FDM 3D tiskáren

Jádrem elektroniky 3D tiskáren je řídicí jednotka, nebo také mikrokontrolér. Kvůli původnímu projektu RepRap využívajícímu k řízení čipy Atmel se dnes u většiny tiskáren používá platformy Arduino. Konkrétně vývojové desky Arduino Mega 2560 s 8-mi bitovým čipem ATmega2560, ale od 8-bit architektury se postupně upouští.

Díky open-source původu samotného Arduina vzniklo množství rozšiřovacích modulů, tzv. shieldů, poskytujících spojovací rozhraní mezi řídicí jednotkou, ovládáním, řadiči krokových motorů a výkonovými prvky. Nejznámější z těchto desek je typ RAMPS, který kontroléru umožňuje připojení až pěti motorových driverů a spínání tří topných prvků. Z kombinace Arduino Mega a rozšiřujících desek pak vznikly samostatné řídicí moduly jako RAMBo, které na jedné společné desce obsahuje řídicí čip ATmega2560 spolu se všemi vstupními a výstupními periferiemi RAMPS.

Tiskárny se složitějším pohybovým systémem jako delta tiskárny, kde probíhají náročné matematické operace pro kalkulaci pohybu, příliš zatěžují 8-mi bitovou architekturu čipu a vyžadují výkonnější řešení. Existují sice delta tiskárny s 8-mi bitovou řídicími jednotkami, ale nevykazují příliš spolehlivosti při několika požadavcích najednou. Pro tyto případy se používají výkonnější 32-bit mikrokontroléry architektury ARM. Například Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 je ve formě Arduino Due používán s rozšiřujícími deskami RAMPS-FD, nebo 32-bit Re-ARM na platformě LPC1768. Ukázkou jednodeskového řešení podobného zapojení je Duet WiFi, který má ve funkcích zahrnutou i bezdrátovou síťovou kartu. Sortiment 32-bit desek se postupně rozšiřuje a stará 8-bit řešení jsou na ústupu. Níže přiložená tabulka č. 1 představuje několik nejpoužívanějších desek a jejich základních údajů.

Tabulka 1 – Příklady desek

Desky	Architektura	Čip	Frekvence CPU	Napájení	Firmware
Ultimaker Electronics	8bit	ATmega1280	16MHz	12V	Ultimaker firmware
RAMBo	8bit	ATmega2560	16MHz	12V	Marlin 1.1.9 a další...
Geeetech Rumba	8bit	ATmega2560	16MHz	12V	Marlin 1.1.9 a další...
RAMPS + Mega	8bit	ATmega2560	16MHz	12V	Marlin 1.1.9 a další...
RAMPS + Due	32bit	M3 SAM3X8E	84MHz	12V	Marlin 2.0
RAMPS + Re-ARM	32bit	M3 LPC1768	100MHz	12V, 24V	Marlin 2.0
Smoothieboard	32bit	M3 LPC1769	120MHz	12V, 24V	Smoothieware
MKS Sbase	32bit	M3 LPC1768	100MHz	12V, 24V	Marlin 2.0, Smoothie
Duet	32bit	M4 SAM4E8E	120MHz	12V, 24V	RepRap Firmware
Gen 7 Arm v2	32bit	M0+ LPC1114	50MHz	12V	Teacup

Důležitou součástí elektroniky 3D tiskáren jsou motorové drivery. Jedná se zpravidla o čipy, které jsou specializované na řízení krokových motorů. Různé čipy pak mají různé zatěžovací proudy, speciální funkce a vlastnosti. Nejdůležitějšími faktory jsou právě maximální povolený proud do motoru a tzv. mikrokrokování. Mikrokrokování je dělení fyzických kroků motoru na části, ve kterých je driver schopen nastavit rotor. Tedy každý fyzický krok motoru je driverem elektricky rozdělen na nastavený počet mezipoloh, ve kterých driver polohuje rotor motoru poměrem proudů v cívkách statoru. Pak krokový motor může nabývat přesných pozic i mimo jeho fyzické kroky. Nejčastěji se používá dělení kroků 1:8, 1:16 a 1:32. Nevýhodou mikrokrokování je, že při velkém dělení sice jsou motory přesné, ale rychle ztrácí svůj statický moment. U 3D tiskáren jsou nejčastěji používány tyto čipy na malých deskách plošných spojů s vývodovými hřebínky. Tento formát se označuje StepStick. Nejnovějšími zástupci těchto čipů jsou níže uvedené drivery Trinamic v tabulce č. 2. Disponují funkcemi jako snižování proudu mimo aktivitu motoru, komunikace s řídicí jednotkou, detekce přeskočení kroků a další. [11]

Tabulka 2 – Přehled driverů firmy Trinamic

SilentStepStick	TMC2100 (5V)	TMC2100 (3-5V)	TMC2130 (3-5V)	TMC2208 (3-5V)
SilentStepStick				
Interface	Step/Dir	Step/Dir	Step/Dir or SPI	Step/Dir
Configuration	CFG Pins	CFG Pins	CFG Pins or SPI	CFG Pins or UART
Native Microsteps*	up to 1/16	up to 1/16	up to 1/256	up to 1/256
microPlyer Microsteps	1/256	1/256	1/256	1/256
Logic Voltage $V_{IO}$	5V	3 - 5V	3 - 5V	3 - 5V
Motor Voltage $V_M$	4.75 - 46V	5.5 - 46V	5.5 - 46V	5.5 - 36V
Motor Phase Current	1.2A RMS, 2.5A Peak	1.2A RMS, 2.5A Peak	1.2A RMS, 2.5A Peak	1.2A RMS, 2.0A Peak
$V_M$ always needed**	no	yes	yes	yes
Internal V-Regulator**	disabled	enabled	enabled	enabled
RDSon	$\geq 0.5$ Ohm	$\geq 0.5$ Ohm	$\geq 0.5$ Ohm	$\leq 0.3$ Ohm
stealthChop (quiet)	yes	yes	yes	yes
spreadCycle	yes	yes	yes	yes
coolStep	no	no	yes	no
stallGuard	no	no	yes	no
dcStep	no	no	yes	no



## 5.2 Software a firmware FDM tiskáren

Aby byly modely tisknutelné, musí se zkonvertovat do formátu dat, který tiskárna umí použít. Většinou tomu bývá NIST RS274NGC G-code standard, podobně jako u CNC frézek, laserů atd. Výsledné soubory s příponou .gcode jsou ve formě prostého textu (viz. *Obrázek 11*).

Software toho schopen je takzvaný slicer (z anglického slova slice – řezat). Jak z jeho názvu vyplývá, slicer nařeže 3D model na jednotlivé vrstvy ve vertikální ose Z. U os X a Y pak vygeneruje sekvenci pohybů, které opisují tvary modelu v dané vrstvě Z. Ve sliceru se zároveň nastaví požadované teploty, rychlosti, materiály a další parametry potřebné pro správný výtisk. Výsledkem je pak soubor obsahující sekvencně uspořádané souřadnice pohybů, jejich rychlost a další instrukce speciálně pro dané zařízení, na kterém se bude soubor tisknout. Nejpoužívanější zástupci slicerů jsou programy Slic3r a Cura. Zároveň díky G-code standardu společnému s CNC frézkami a lasery je možné při vhodné mechanické konstrukci 3D tiskárny stejný stroj použít i na například frézování DPS a vypalování laserem.

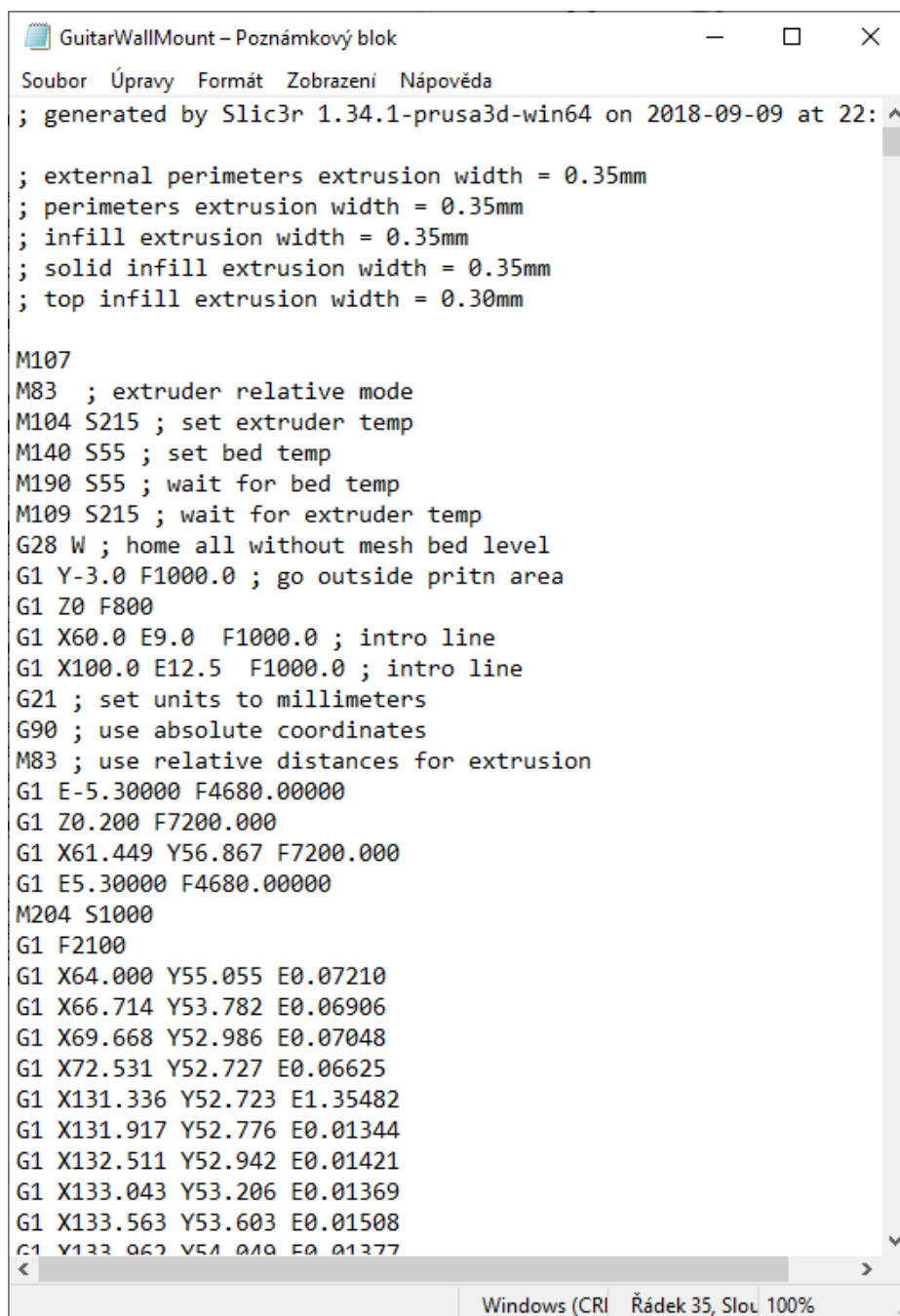
Firmware tiskáren se stará o čtení instrukcí z G-code souboru a samozřejmě o samotné řízení tiskárny jako je pohyb a žhavení topných prvků. Většina FDM tiskáren dnes má desky založené na již zmiňované platformě Arduino. Tedy samotný software často bývá konfigurován a instalován z programovacího software Arduino, jehož základem je ale známý programovací jazyk C, takže možnosti úprav a použití je mnoho. Open-source politika a užívaný programovací standard napomohl vzniku několika druhů firmware a jejich modifikací, jak pro 8-bit, tak i pro 32-bit desky.

Nejvíce používaným řídicím programem pro FDM tiskárny je Marlin, velmi efektivní a široce konfigurovatelný firmware, který se neustále komunitně vyvíjí. Vývoj pouze 8-bit verze byl ukončen finální verzí 1.1.9, ale s verzí 2.0 přišla podpora 32-bit ARM desek. Marlin je univerzálně použitelný pro většinu základních desek 3D tiskáren a jeho flexibilita umožňuje tiskárnu použít i jako CNC frézku či gravírovací laser, jelikož je schopný zpracovávat většinu standardizovaných G-code příkazů. Pokud však nějaký potřebný příkaz chybí, lze ho jednoduše v tomto přehledném programu doplnit a určit funkci. Jeho 8 i 32-bit verze (verze Marlin 2.0) poskytují nastavení každého parametru daného stroje. Od základních fyzických restrikcí, jako velikost tiskové plochy a délky os až po konfigurace teplotních profilů, bezpečnostních opatření a složitých pohybových funkcí. Marlin také podporuje složitější operace potřebné pro stroje typu delta, nebo CoreXY, kde ale 8-bit desky mohou dosahovat výkonostního limitu. Dalšími výhodami jsou možnost ukládání do paměti EEPROM, čtení SD karet a funkce automatického vyrovnání tiskové podložky. Může se totiž stát, že tisková plocha je pokřivena, nebo nesvívá kolmici s vertikální osou a pomocí dotykového, nebo vzdálenostního čidla na tiskové hlavě je firmware schopen tyto nerovnosti kompenzovat tak, aby tisknutý model zůstal věrný originálu bez zahrnutí rozměrových chyb tiskárny. Samozřejmostí jsou i konfigurace zobrazovacích a ovládacích prvků, osvětlení, atd. Marlin je volně ke stažení na stránkách Github. [12]

Mezi méně známé zástupce řídicích programů se řadí Repetier, který se soustředí spíše na rychlost, jednoduché uživatelské prostředí a neobsahuje tolik pokročilých funkcí jako Marlin. Nebo například Smoothie, podporující internetové připojení a USB flash čtení, ten je ale použitelný pouze na deskách Smoothieboard nevycházejících z Arduina.

MK4due je zase dedikován pouze na 32-bit platformy a má zatím největší databázi podporovaných 32-bit desek a pohybových systémů.

Alternativních zástupců firmware je mnoho, ale u velké části z nich byl již ukončen oficiální vývoj, nebo jsou použitelné pouze pro specifické desky. Nově s 32-bit podporou a téměř univerzální a aktuální Marlin i jeho mutace se tedy stávají standardem pro výrobce i komunitní stavitele tiskáren.



```
GuitarWallMount - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
; generated by Slic3r 1.34.1-prusa3d-win64 on 2018-09-09 at 22:

; external perimeters extrusion width = 0.35mm
; perimeters extrusion width = 0.35mm
; infill extrusion width = 0.35mm
; solid infill extrusion width = 0.35mm
; top infill extrusion width = 0.30mm

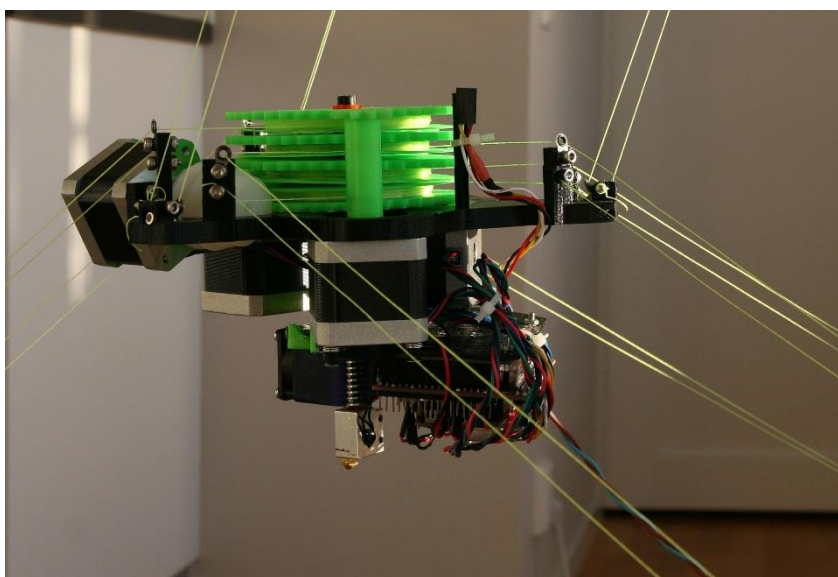
M107
M83 ; extruder relative mode
M104 S215 ; set extruder temp
M140 S55 ; set bed temp
M190 S55 ; wait for bed temp
M109 S215 ; wait for extruder temp
G28 W ; home all without mesh bed level
G1 Y-3.0 F1000.0 ; go outside print area
G1 Z0 F800
G1 X60.0 E9.0 F1000.0 ; intro line
G1 X100.0 E12.5 F1000.0 ; intro line
G21 ; set units to millimeters
G90 ; use absolute coordinates
M83 ; use relative distances for extrusion
G1 E-5.30000 F4680.00000
G1 Z0.200 F7200.000
G1 X61.449 Y56.867 F7200.000
G1 E5.30000 F4680.00000
M204 S1000
G1 F2100
G1 X64.000 Y55.055 E0.07210
G1 X66.714 Y53.782 E0.06906
G1 X69.668 Y52.986 E0.07048
G1 X72.531 Y52.727 E0.06625
G1 X131.336 Y52.723 E1.35482
G1 X131.917 Y52.776 E0.01344
G1 X132.511 Y52.942 E0.01421
G1 X133.043 Y53.206 E0.01369
G1 X133.563 Y53.603 E0.01508
G1 X133.962 Y54.049 E0.01377
```

Obrázek 11 – Ukázka G-kódu generovaného ve sliceru Slic3r

## 5.3 Modifikace FDM 3D tiskáren

Díky open-source původu RepRap projektu a jeho dostupnosti informací vzniká v komunitě velké množství unikátních tiskáren a zařízení. Vyvíjí se zejména stroje pracující s více tiskovými hlavami najednou, nebo se schopnosti použití více materiálů na jedné tiskové hlavě. Je pak možné vyrobit objekty z více materiálů, či barev v jediném procesu. V provozu je již velké množství takto vybavených RepRap tiskáren, ale většinou se jedná o experimentální nasazení a v běžném provozu se příliš nevyužívá kvůli nedořešeným technickým problémům. Některým výrobcům se ale podařilo úspěšně implementovat tento návrh a například tiskárna Ultimaker 3 z roku 2017 je již osazena dvěma zásuvnými tiskovými tryskami. Česká firma Prusa Research již předvedla RepRap tiskárnu Průša i3 Mk3 Multimaterial, která jednou tryskou dokáže tisknout z pěti různých materiálů.

Velikost původně stolních RepRap tiskáren je také upravována a komunitní projekty zahrnují tiskárny jak velmi drobné s tiskovou plochou jen pár centimetrů, tak i velké tiskárny BigRep s metrovou délkou každé osy. Raritou je bezrámový Hangprinter, který se zavěšuje za lanka ukotvena ve stropu a stěnách místnosti, pomocí kterých se i pohybuje jejich namotáváním.



*Obrázek 12 - Bezrámová 3D tiskárna Hangprinter [4]*

Samotné tiskové hlavy jsou také nahrazovány jinými nástroji. Jelikož jsou FDM tiskárny založeny na CNC strojích, je možné tiskovou hlavu vyměnit například za laser, či vysokootáčkový motor a použít tiskárnu jako řezací plotter, CNC frézku atd. Flexibilita firmwaru pak umožní z FDM 3D tiskárny vytvořit univerzální platformu schopnou několika různých výrobních procesů. Taková platforma ale musí splňovat náročnější mechanická kritéria než klasická FDM 3D tiskárna.

## 6. MODULÁRNÍ 3D FDM TISKÁRNA

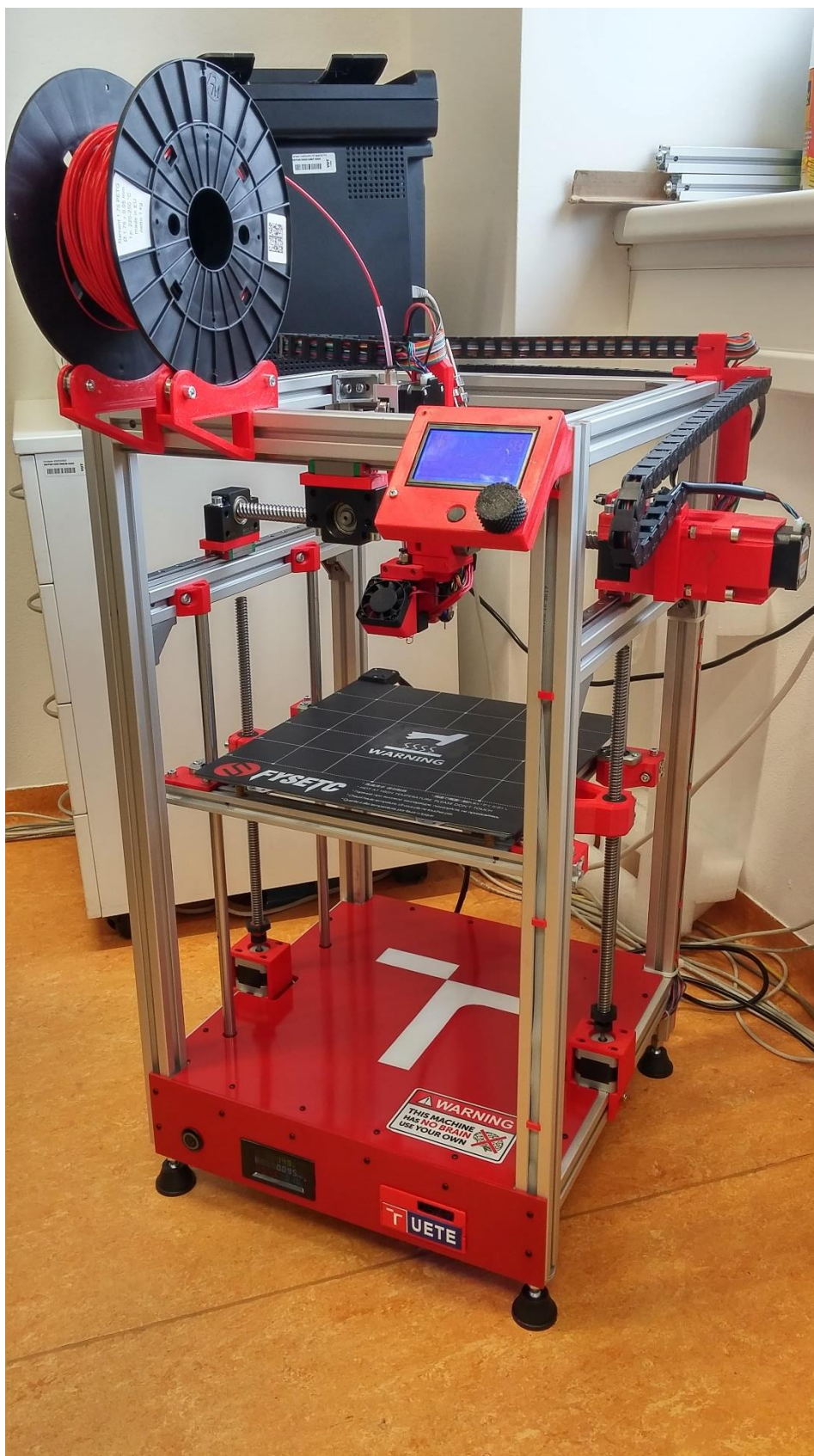
Pro vytvoření modulární FDM tiskárny jakožto více účelové CNC platformy schopné pracovat s více nástroji bylo nutné navrhnout mechanická řešení, která by byla pevnější a rychlejší než u většiny strojů zaměřených pouze na 3D tisk. Zároveň bylo nutné vybrat takový kompromis, který by vyhovoval i pro použití v 3D tisku, jakož to stále primární funkce daného zařízení.

Byl tedy navrhnut a sestaven prototyp níže popsaného CNC zařízení (viz. *Obrázek 13*), které je přesné, rychlé, však stále konstrukčně jednoduché a modifikovatelné. Původní hrubý odhad na cenu takového zařízení byl 35000 Kč. Finální cena se však vyšplhala na 38430 Kč, tedy odhadnutý rozpočet byl přesažen o 3430 Kč. To znamená navýšení celkových nákladů o 9,8 %. Níže je tabulka č. 3, která rozepisuje ceny jednotlivých komponent a potřebných materiálů. Některé díly byly pořízeny v zahraničí, takže jejich cena v závislosti na měnovém kurzu nemusí být aktuální. Tabulka je aktuální k datu 27.5.2019. V celkové ceně nejsou zahrnuty vodiče a velká část spojovacích materiálů, jelikož to je dostupná komodita a při tomto projektu byly tyto materiály poskytnuty.

*Tabulka 3 – Rozpočet projektu*

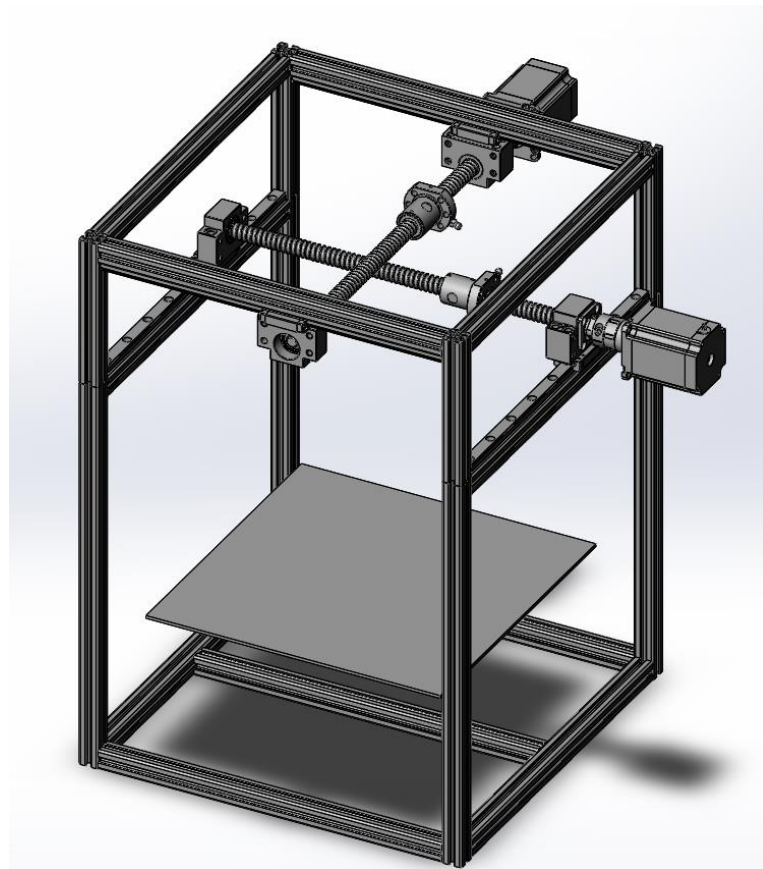
Komponent	Cena USD	Cena CZK
Zdroj 350 W 24 V	30,01	692
Re-ARM	25,27	584
RAMPS 1.6+	9,8	227
LCD obrazovka		535
Tisková podložka	66,13	1527
Profily 3030 na rám		2451
Profily 2020 na Z rámeček		1074
Vodící tyče a trapézy		2144
Šrouby a lineární vedení HIWIN		22828
Motory X, Y	40,18	928
Motory Z		750
Dotykový senzor 3D touch	13,57	452
Tryska typu E3D V6	16,68	386
24V ventilátory (4 kusy)	3,99	93
Motorové spojky	34,37	794
Matice do profilů, rohové spojky	43,82	1012
Energetické řetězy		280
Plast PET-G Verbatim (2 kg)		1200
Krycí plexisklo		140
Wattmetr	14,35	333
Celkem		38430





Obrázek 13 - Modifikovatelná 3D FDM tiskárna

## 6.1 Mechanická konstrukce



*Obrázek 14 - Zjednodušený návrh zařízení*

Z předpokladu, že zařízení by mohlo být osazeno těžkou pracovní hlavou s frézovacím motorem, nebo naopak lehkým laserem, který vyžaduje vysoké rychlosti a přesnost, vyplývá, že klasické řešení pohybového systému s řemenem a pojezdy na tyčích nemusí být dostatečné. Je možné použít konstrukci CoreXY, nebo systému tiskáren Ultimaker. Ty však jsou poměrně komplikované na stavbu a řemen stále nemá potřebnou tuhost pro spolehlivé směřování těžké pracovní hlavy ve velkých rychlostech. Také lineární kuličková ložiska používaná na FDM 3D tiskárnách (nejčastěji typu LM8UU) mají poměrně velké tolerance a krátkou životnost při dlouhodobé intenzivní zátěži.

Je patrné, že pokud chceme dosáhnout nadstandardních rychlostí i vyšší nosnosti, tak pohybový aparát horizontálních os bude do rámu tiskárny předávat silné rázy a vibrace při prudkých změnách v pohybu. Vznikl tedy návrh pro použití hliníkových T-slotových profilů 3030 jako hlavních nosníků rámu (viz. *Obrázek 14*). Tyto profily jsou pevné, lehké a sloty v profilech jsou jednoduše použitelné pro spolehlivé uchycení dalších dílů stroje. Vzhledem k charakteru os X a Y byl tvar rámu vybrán dle vzoru tiskáren Cube, osvědčený a pevný design používaný na mnoha tiskárnách. Nosníky byly v místech spojů provrtány, aby je bylo možné pravoúhle uchytit pomocí šroubů zachycených hlavou ve slotu rámu. S přidáním rohových výztuží pak vznikl přesný a pevný rám, který vyhovuje požadavkům nejen 3D tiskárnám, ale i náročnějším CNC strojům. Rámeček tiskové podložky byl řešen podobným způsobem, však místo profilů 3030 byly využity menší profily 2020, jelikož

zde v tomto případě není potřebná robustnost jako na rámu. Byla tedy ušetřena hmotnost i náklady.

Pro pohyb osy X a Y bylo navrženo použití kuličkových šroubů, na jejichž konci by se nacházel dostatečně výkonný krokový motor. Výběr konkrétních šroubů znamenal určit kompromis mezi stoupáním závitu šroubu a celkovou velikostí a hmotností. Příliš velké stoupání by mělo za následek ztrátu rozlišení osy, malé stoupání zase zpomalí pohyb osy. Byl vybrán typ kuličkového šroubu 1616 s maticí R16-16K3-FSCDIN firmy HIWIN s třídou přesnosti T7. Jedná se tedy o šrouby s průměrem 16 mm a stoupáním 16 mm na jednu rotaci, díky kterým je možné dosáhnout vysokých rychlostí se zachováním vyhovující přesnosti pohybu osy. Uvedené vztahy (6.1 pro osy X a Y, 6.2 pro osu Z) jsou pro výpočty rozlišení os s krokováním motorových driverů TMC2208 nastavených na 1:16 mikrokroků. Jelikož vybrané motory mají fyzicky 200 kroků, drivery je tedy budou používat jako s 3200 kroky na jednu rotaci.

$$res = \frac{ph}{n} = \frac{16}{3200} = 0,005 \text{ mm} \quad (6.1)$$

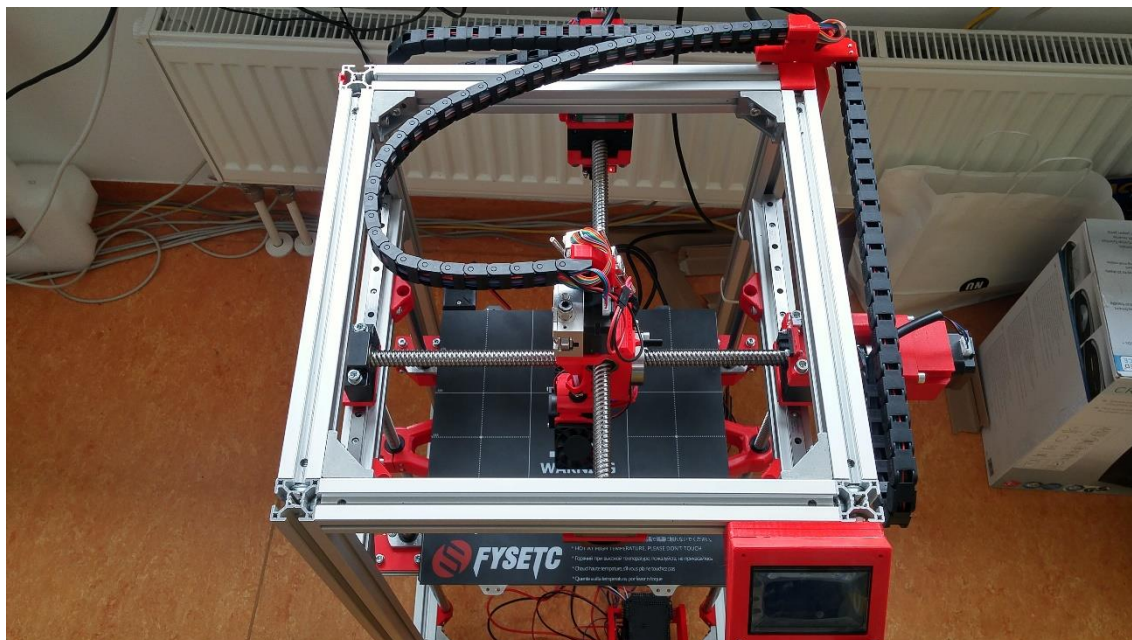
Kde  $res$  je rozlišení osy,  $ph$  stoupání závitu a  $n$  je počet nastavitelných kroků motoru. Pro osu Z platí stejný vztah, však  $ph$  zde nabývá hodnoty 3 mm dle typu trapézy.

$$res = \frac{ph}{n} = \frac{3}{3200} = 0,000937 \text{ mm} \quad (6.2)$$

Uvedené rozlišení osy X a Y (5 mikronů) je stejné, jako u většiny FDM 3D tiskáren využívajících řemenový systém GT2. Se stejným rozlišením osy je však tento kuličkový šroub tužší a je schopen pracovat s větší zátěží při vyšších rychlostech, než řemen.



16 milimetrů tlusté šrouby jsou dostatečně pevné na to, aby byly využity zároveň i jako nosná tyč pracovní hlavy, nikoli pouze pro přenesení rotace motoru na pohyb osy. Zjednoduší se tím i celková konstrukce osy X a Y (*Obrázek 15*).



*Obrázek 15 - Realizace osy X a Y*

Samotné šrouby se kříží maticemi v pracovní hlavě a jejich konce byly umístěny v ložiskových pouzdrech BK12 pro stranu s motorem a BF12 pro volný konec. Oba konce byly pak upevněny na lineárních vozících uchycením šroubky skrze tisknuté díly. Na každém ze šroubů jsou pak na jednom konci umístěny odnímatelné motory, spojkou přímo ukotveny se samotným šroubem bez žádného převodu. Principově se roztočením motoru osy X, potažmo Y, buďto odtlačí nebo přitáhne druhá osa, kolmá k rotujícímu šroubu, právě díky tomu, že konce os jsou umístěny na posuvných kolejnicích. Motory se tedy v tomto případě posouvají spolu s osou. Kombinací pohybu obou motorů je pak hlava schopna nabývat jakékoli souřadnice v pracovní oblasti.

Posun konců šroubů je zajištěn lineárními kolejnicemi s kuličkovými vozíky MGN12H, opět od firmy HIWIN. Lineární kolejnice jsou při správném nastavení a údržbě přesnější a odolnější náhradou za vedení tyčové s lineárními kuličkovými, či kluznými ložisky. Kolejnice byly uchyceny díky slotům v rámu pomocí specializovaných slotových matic. Rovnoběžnost protějších vedení a jejich přesné umístění uprostřed profilu byla zajištěna použitím vytisknutých plastových přípravků, které fixovaly kolejnice na správném místě. Po dotažení kolejnic k rámu byly přípravky odejmuty (viz. *Obrázek 16*). Další přípravky byly využity i při stavbě samotného rámu kvůli zachování rovnoběžnosti horizontálně montovaných profilů.

Předpokládanou nevýhodou tohoto systému je fakt, že pohybující se osy mají poměrně velkou hmotnost kvůli těžkým šroubům a motorům. Použité díly však mají minimální tolerance ve svém pohybu a výkonné motory by měly zajistit přesné zastavení, či změnu směru i přes velký setrvačný moment rychle se pohybující, těžké osy.





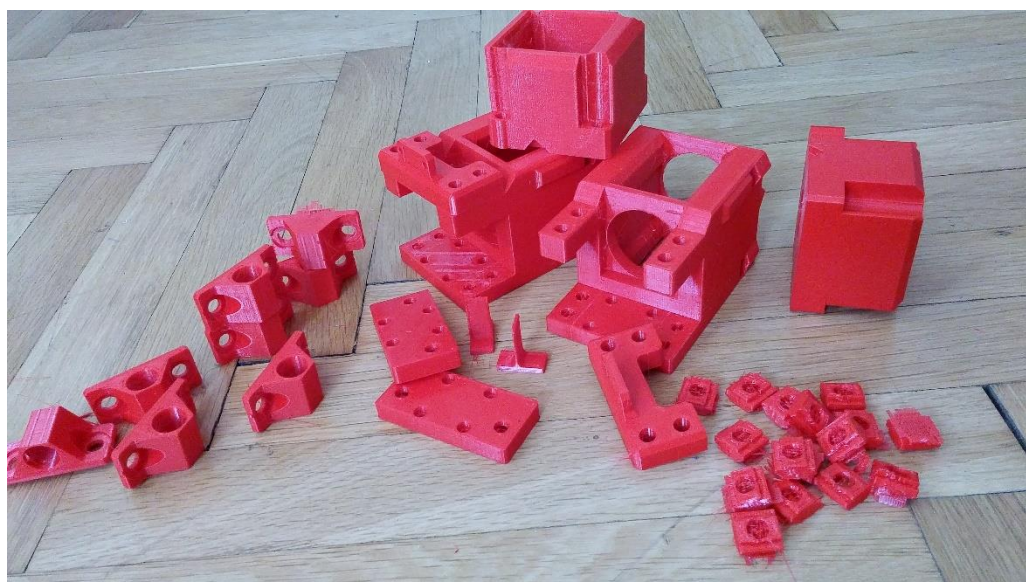
*Obrázek 16 - Přípravky pro správné umístění kolejnic*

Vertikální osa Z byla řešena standartní mechanikou používanou u 3D tiskáren, kde je podložka vedena vodícími tyčemi pomocí ložisek v rozích podložky. Mezi vodícími tyčemi jsou pak umístěny trapézové tyče s motorem, které skrze POM matici upevněnou na rámu podložky přenášejí pohyb nahoru, či dolů (viz. *Obrázek 17*). Osa Z nebude nijak zvlášť namáhána a nejsou u ní požadavky na zvýšenou rychlost, tuhost, či nosnost. Zároveň se osa Z u tiskáren i podobných CNC pohybuje pomalu, takže nízké stoupání trapéz není nežádoucí. Konkrétně byly vybrány trapézy TR12x3. Jsou dostatečně tlusté, aby nedošlo k jejich deformaci a nízké stoupání zajistí vysoké rozlišení v této ose, což je kritický faktor zejména pro 3D tisk. Zároveň nebude docházet k samovolnému pádu osy vlastní vahou při vypnutých motorech, jako se stává u strmějších trapézových tyčí se stoupáním 8 mm.



*Obrázek 17 - Řešení posuvu osy Z*

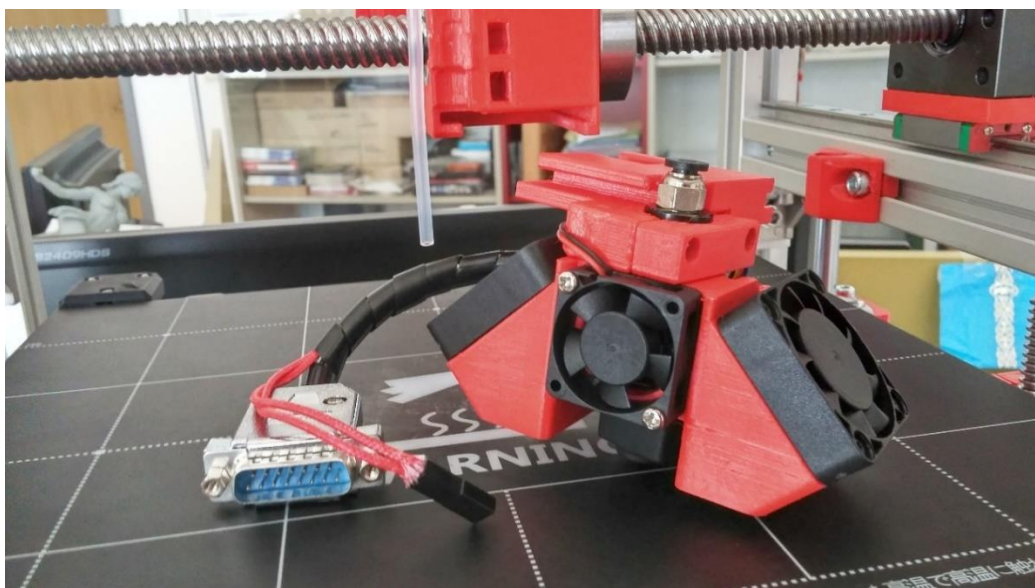
Plastové díly tiskárny byly v duchu projektů RepRap tisknuty na několika FDM 3D tiskárnách. Většina součástí byla navrhována v programu Autodesk Inventor a pro jejich tisk byl použit plast PET-G firmy Verbatim (*Obrázek 18*). Plast PET-G je teplotně odolný do 80 °C a dostatečně tuhý pro toto použití. Obecně je vedle ABS využíván právě ke konstrukčním účelům technického rázu. Pro vzhledové sladění s plánovaným reprezentativním vzezřením tiskárny byla vybrána červená barva RAL3020. Výplň většiny dílů byla nastavena na 70 % a počet vnějších perimetrů (stěn) na 4. Při takovém tisku je spotřebováno hodně materiálu, výsledná pevnost dílů je však při tomto použití důležitá. Některé univerzální díly jako rám obrazovky, držák filamentu, či trychtýř ventilátorů na tiskové hlavě byly tisknuty z modelů poskytovaných komunitní webovou stránkou Thingiverse, která dovoluje volné nekomerční šíření těchto modelů pod licencí zvanou Creative Commons. Spojení všech dílů s rámem a dalšími periferiemi je řešeno sešroubováním.



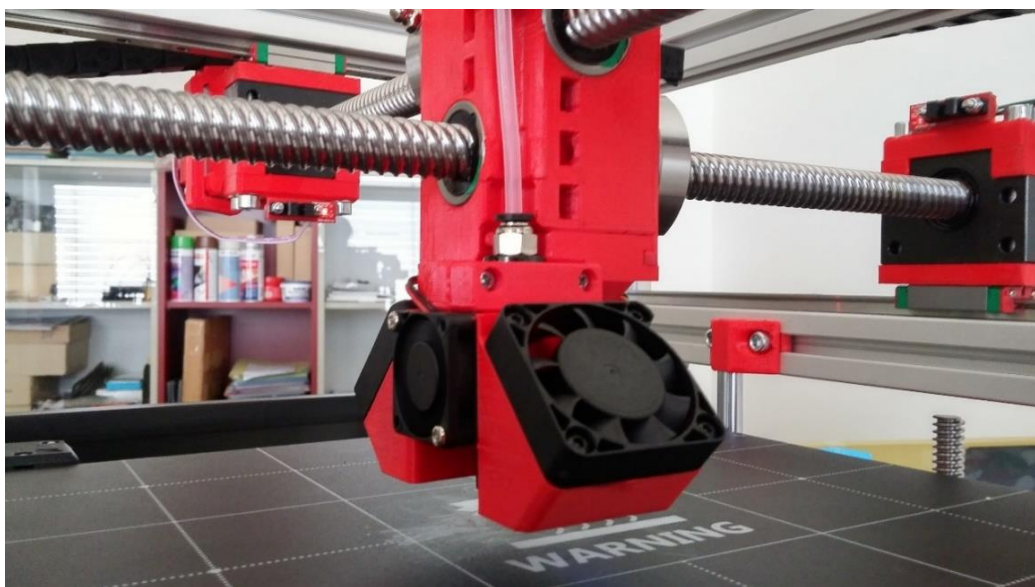
*Obrázek 18 - Tisknuté díly z plastu PETG*

Pro zachování možnosti rychle a pohodlně vyměnit pracovní hlavu s jiným nástrojem, byla sestava hlavy modelována se slotem, do kterého se nástroje zasouvají. Elektronika tiskové hlavy je propojena se zbytkem tiskárny konektory (viz následující kapitola 6.2), takže prostým odpojením konektorů a vysunutím ze slotu lze nástroj odejmout a nahradit jiným. Zároveň je zde možnost odmontovat extruder uchycený dvěma šrouby k horní části pracovní hlavy. Jeho propojení se zbytkem tiskárny je opět řešeno konektory. Po jeho odejmutí a vyjmutí tiskové hlavy ze slotu pak zůstává pouze holý CNC pohybový systém (viz. *Obrázky 19 a 20*).

Veškeré díly navrhované pro tento projekt v programu Inventor jsou obsaženy na příloženém CD ve formátech .stl , .stp a .ipt.



*Obrázek 19 - Odnímatelná tisková hlava*

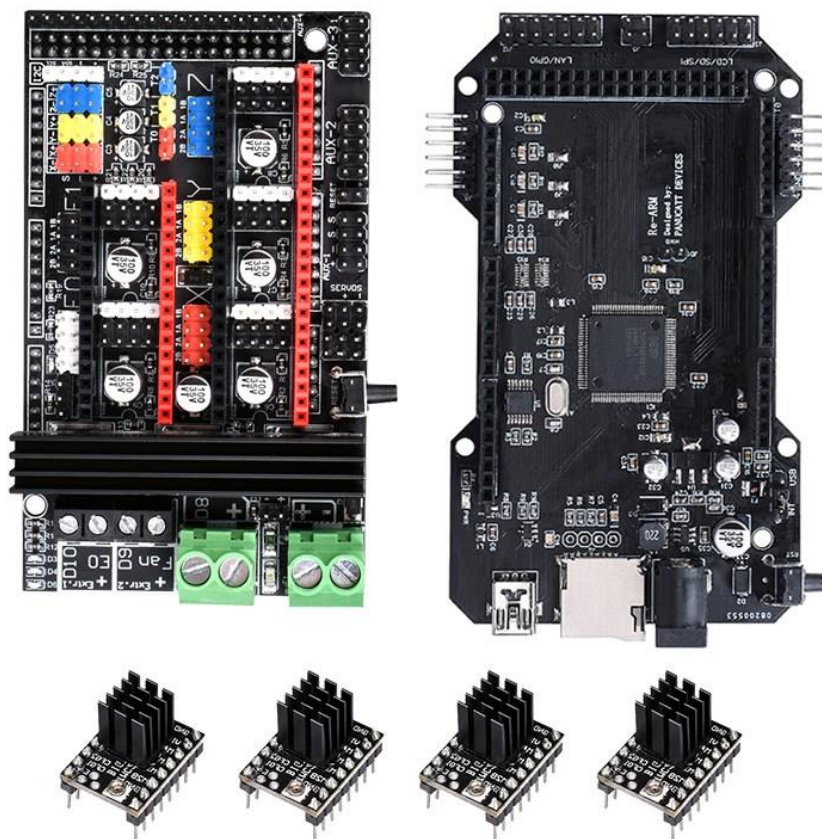


*Obrázek 20 - Nainstalovaná tisková hlava*



## 6.2 Elektronika

Výkon a modulárnost byly hlavními faktory při výběru řídicí desky. Tyto kritéria plně zastává deska Re-ARM, zmíněna v kapitole 5.1, která díky 32-bitovému mikroprocesoru LPC1768 Cortex®-M3 má více než dostatečný výkon pro toto použití. Přímě na desce umístěný microSD slot určený k nahrávání firmwaru umožňuje rychlou výměnu celého řídicího softwaru a jeho konfigurací. Pro konverzi této tiskárny například na frézku plošných spojů tedy stačí pouze nahradit nástroj ve slotu pracovní hlavy a vložit microSD kartu s příslušnou konfigurací. Re-ARM automaticky detekuje změnu karty a jiný firmware si nahraje do paměti. Pro navrácení do původního stavu tiskárny lze pak opět vrátit tiskovou hlavu a vložit kartu s firmwarem připraveným pro 3D tisk.



Obrázek 21 - Desky RAMPS 1.6+, Re-ARM a drivery

Díky vývodovému rozložení shodnému s Arduino MEGA byl vybrán rozšiřující shield RAMPS v nejnovější verzi 1.6+. Tato rozšiřující deska poskytuje skrze MOSFET tranzistory B55NF06 řízení dvou tiskových hlav, či ventilátorů nebo motorů a také řízení jednoho silnějšího výkonového výstupu s tranzistorem WSK220N04 s celkovou zátěží do 270 W. Současně RAMPS 1.6+ kromě velkého množství univerzálně využitelných digitálních pinů obsahuje periferie pro až šest koncových spínačů, tři termistory, SPI a I<sup>2</sup>C sběrnici a pět slotů pro motorové drivery ve formátu StepStick. Výhodou této desky v kombinaci s Re-ARM je velká modulárnost a jednoduchá modifikovatelnost se zachováním výpočetního výkonu (viz. Obrázek 21).

O řízení krokových motorů se starají drivery TMC2208 firmy Trinamic. Vyznačují se tichým a plynulým provozem motorů při zatížitelnosti až 2 A špičkově a 1.4 A kontinuálně v širokém rozsahu pracovních napětí 4,75 - 36 V. Oproti starším StepStick driverům jako A4988, nebo DRV8825 mají drivery Trinamic také možnost komunikace s mikroprocesorem pomocí UART (TMC2208) nebo SPI (TMC2130) standartu a jsou vybaveny krokovým děličem až na 1:256 pro přesné a plynulé polohování. Samozřejmostí jsou ochrany proti zkratu, přepólování a přehřátí. Motorové drivery a výkonové MOSFET tranzistory na RAMPS jsou opatřeny hliníkovými chladiči a celá sestava Re-ARM a RAMPS 1.6+ s drivery je ofukována 70 mm ventilátorem pro efektivní odvádění tepla z chladičů.

Krokové motory byly vybrány s  $1.8^\circ$  na krok, tedy 200 kroků na otáčku. Příruba byla zvolena typu NEMA 17, stejně jako u většiny 3D tiskáren a podobných zařízení. Pro osy X a Y bylo vhodné použít silnější konfigurace právě těchto motorů, jelikož vyšší řada NEMA 23 jsou příliš velké a těžké motory pro toto použití. Konkrétně pro horizontální osy byly použity 60 mm dlouhé NEMA 17 se statickým momentem 0,89 Nm. Pro osu Z byly nainstalovány menší motory s délkou 40 mm a statickým momentem pouze 0,52 Nm, jelikož zde není třeba takových výkonů, jako na horizontálních osách. Tabulka č. 4 shrnuje základní parametry zvolených motorů.

*Tabulka 4 – Přehled použitých motorů*

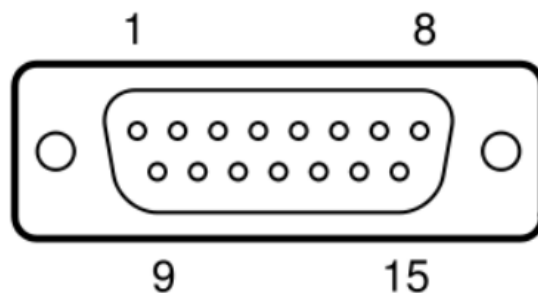
Model (umístění)	J-4218HB4401 (X, Y)	SX17-1005LQCEF (Z)
Úhel kroku	$1,8^\circ (\pm 5\%)$	$1,8^\circ (\pm 5\%)$
Statický moment (Nm)	0,89	0,52
Jmenovitý proud (A)	2,3	1
Indukčnost (mH)	4	7
Odpor ( $\Omega$ )	1,6	2,95
Délka (mm)	59,5 (60 max.)	40
Hmotnost (kg)	0,47	0,3

Koncové spínače v CNC pojmech jsou logické prvky a čidla, které zajistí orientaci pracovní hlavy v prostoru, jelikož firmware pracuje v inkrementálních souřadnicích od počátku, tedy od nuly, kde hlava parkuje. Při spuštění zařízení tedy program nemá informace o tom, kde se nachází všechny osy. Před provedením úkonu tedy musí všechny osy najít svou počáteční souřadnici, což je místo, kde se sepne koncový spínač. Jako koncové spínače pro osy X a Y byly vybrány optické brány. Oproti tlačítkovým spínačům jsou rychlejší, přesnější a spolehlivější, jelikož neobsahují žádné mechanické díly. Pro osu Z byla na tiskové hlavě umístěna precizní dotyková sonda. Funguje na principu solenoidem vysunující se kovové tyčinky. Při parkování podložky, tedy osy Z, se tyčinka vysune pulsem solenoidu a dotykem podložky se tyčinka zatlačí zpět. Ta zasunutím spojí obvod a senzor je sepnut. Výhodou této sondy je, že není náchylná na teplo z tiskové hlavy a podložky, a také negativně nereaguje ani na poklesy napětí jako např. indukční bezdotykové senzory. Zároveň díky zasunutí dotykové tyčinky mimo aktivní dobu pak senzor nepřekáží při tisku.

Tisková hlava je celokovová typu E3D V6 s tryskou 0.4 mm, která však samozřejmě vyměnitelná za jiné průměry. Žhavení trysky zajišťuje 24 V 40 W odporové tělísko a teplotu snímá 100 K NTC termistor, stejně jako teplotu tiskové podložky. Ta je tvořena plošným spojem na sklolaminátové desce, jehož meandrovitě složené vodivé cesty tvoří samotný topný element. Ve vyfrézovaných slotech desky jsou pak magnety, které udržují pružný plech s PEI (Ultem) vrstvou na podložce. Ta slouží k adhezi roztaveného plastu. Vytisknuté výrobky je pak jednodušší odstranit z odnímatelného pružného plechu než z povrchu tvrdé podložky. Výtisk se totiž může přichytit na podložce příliš silně, avšak jednoduchým ohnutím pružného plechu výtisk odskočí od povrchu.

Vyhovující výkon motorů (jelikož jejich výkon klesá s napětím) a rychlé zahřívání topných prvků bylo zajištěno 24 V 350 W zdrojem MEAN WELL LRS-350-24. Napájecí napětí 24 V vyžaduje úpravy u některých kombinací řídicích desek a shieldů jako např. Arduino Mega s RAMPS, aby nedošlo k poškození komponent. Většina těchto desek je navrhována pouze pro 12 V napájení, Re-ARM je však určen pro napájení až do 30 V, takže kromě topných prvků a ventilátorů určených pro 24 V nebylo zapotřebí žádných úprav.

Modulární spojení tiskové hlavy a zbytku zařízení zajišťují dva konektory. Konektor CAN 15 je určen na přenesení malých proudů, tedy na napájení malých ventilátorů, senzoru teploty trysky, či dotykového senzoru osy Z umístěného na tiskové hlavě. Propojovací diagram konektoru CAN 15 je na *Obrázku 22* níže. Topné tělísko trysky je kvůli větší energetické náročnosti připojeno zvlášť konektorem JST SYP s proudovým zatížením až 3 A kontinuálně. Veškeré kabely jsou vedeny skrytě ve slotech rámu a v případě přivedení kabelů k pohybujícím se osám je kabeláž vedena v energetických řetězech. Pouze zespodu tiskárny jsou kabeláže odkryty pro usnadnění modifikací a případné servisní práce.



- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| <b>1 - 24V (ventilátor trysky)</b>             | <b>9 - GND (24V)</b>             |
| <b>2 - ventilátor tisku 1 (24V)</b>            | <b>10 - GND (24V)</b>            |
| <b>3 - ventilátor tisku 2 (24V)</b>            | <b>11 - GND (24V)</b>            |
| <b>4 - 5V napájení senzoru osy Z</b>           | <b>12 - GND (5V)</b>             |
| <b>5 - signál pro solenoid v senzoru osy Z</b> | <b>13 - GND (5V)</b>             |
| <b>6 - signál detekce minima osy Z</b>         | <b>14 - rezerva</b>              |
| <b>7 - rezerva</b>                             | <b>15 - druhý pin termistoru</b> |
| <b>8 - první pin termistoru</b>                |                                  |

*Obrázek 22 - Rozložení vývodů konektoru CAN 15*

## 6.3 Firmware

Jako řídicí software byl pro toto CNC zařízení vybrán volně stažitelný Marlin 2 popsán v kapitole 5.2. Je to kompletní a lehce nastavitelný CNC firmware, který nativně podporuje kromě několika tiskových hlav také frézky i lasery, což bylo hlavním rozhodovacím faktorem pro tento firmware. Marlin obsahuje údaje o tiskárně jako délky os, akcelerace a maximální rychlosti, či krokování motorů a další konfigurace nastavené pro správný chod zařízení. Některé z parametrů lze i upravit buďto G-code příkazy skrze USB port řídicí desky, nahráním aktualizované verze programu pomocí microSD karty, nebo pomocí uživatelského rozhraní LCD obrazovky s dekodérem. Je zde i možnost uložit některá nastavení do EEPROM paměti a tato nastavení poté budou pak platná i při instalaci jiného kompatibilního firmware. Pomocí tohoto firmware deska Re-ARM komunikuje s okolím a převádí dodaný G-code pro pohyb os, spíná topné prvky atd. Marlin také obsahuje několik bezpečnostních funkcí, které zabráňují přehřátí, či úplnému spálení topných prvků v případě chyby termistorů, či jejich kabeláže. Ukázka konfiguračního prostředí je níže (viz. *Obrázek 23*). Konkrétně nastavení řízení motorů jako maximální rychlost a akcelerace. Editace a nastavení firmware byla provedena v programu Atom s nástavbou PlatformIO, která umožňuje z textového programu kompilovat firmwarový soubor přijatelný pro čip LPC1768 ve formátu .bin, který se poté skrze microSD kartu nahraje do desky Re-ARM. Správně nakonfigurovaný firmware Marlin 2 je obsažen na příloženém CD.

Nevýhodou nahrávání skrze kartu však je, že po nahrání programu na desku se jako potvrzení o úspěšném implementování přepíše dodaný binární firmware soubor na formát kurzoru. Je tedy nutné mít všechny konfigurované verze programu zálohované a musí se před každým přepsáním nahrát znovu na microSD kartu. Re-ARM je však stále jediná deska, která tímto způsobem dovoluje změnit rychle celý firmware i bez dostupného počítače.

```
/**
 * Default Max Feed Rate (mm/s)
 * Override with M203
 *
 * X, Y, Z, E0 [, E1[, E2[, E3[, E4[, E5]]]]
 */
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 250, 250, 10, 200 }

/**
 * Default Max Acceleration (change/s) change = mm/s
 * (Maximum start speed for accelerated moves)
 * Override with M201
 *
 * X, Y, Z, E0 [, E1[, E2[, E3[, E4[, E5]]]]
 */
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 1000, 1000, 5, 12000 }

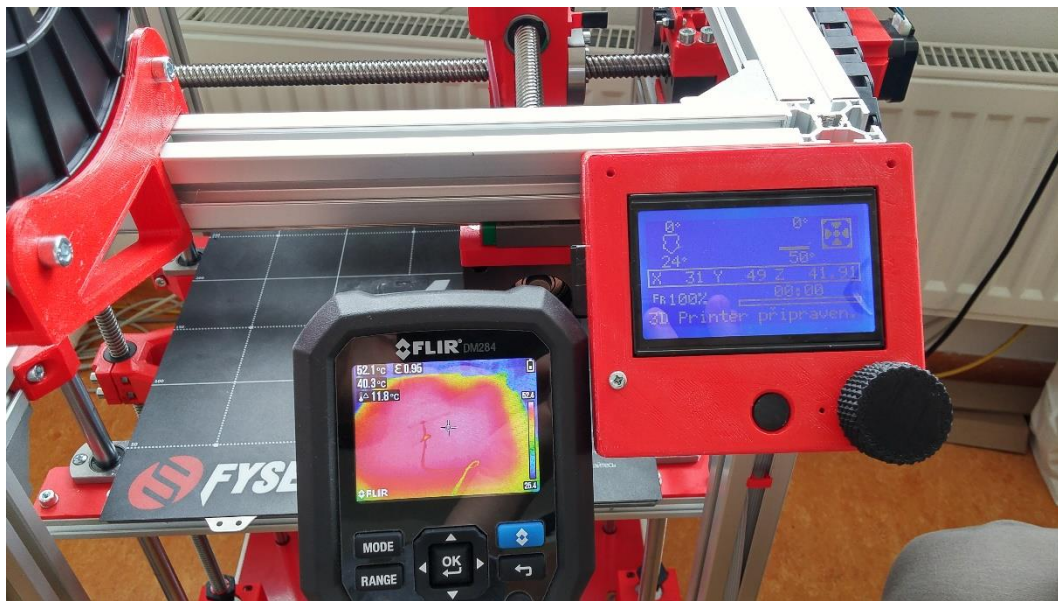
/**
 * Default Acceleration (change/s) change = mm/s
 * Override with M204
 *
 * M204 P Acceleration
 * M204 R Retract Acceleration
 * M204 T Travel Acceleration
 */
#define DEFAULT_ACCELERATION 1000 // X, Y, Z and E acceleration for printing moves
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 1000 // E acceleration for retracts
#define DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION 1000 // X, Y, Z acceleration for travel (non printing) moves
```

*Obrázek 23 - Ukázka konfiguračního prostředí Marlin*



## 6.4 Testovací tisk

Před otestováním tiskárny bylo nutné zkalibrovat topná tělesa a počet kroků motoru na milimetr pohybu osy, případně na extruzi milimetru filamentu. Vybraný firmware Marlin obsahuje funkci PID regulace všech topných těles, jejíž proporcionální, integrační i derivační části vypočítá automaticky z několika průběhů danou teplotou. Hodnoty PID se pak zapíší buďto přímo do firmware, nebo do paměti EEPROM. Teploty byly pak zkontrolovány pomocí termokamery FLIR DM284 (viz. Obrázek 24). Nastavené teploty podložky i trysky se od měřené hodnoty lišily o max. 2 °C.



Obrázek 24 - Kontola teploty podložky termokamerou

Počet potřebných vyslaných kroků na posunutí osy o milimetr u všech os lze určit z parametrů kuličkových šroubů, potažmo trapéz a jejich motorů. V rovnici 6.3 je ukázka výpočtu pro osy X a Y. Pro správné nastavení motoru extruderu bylo však nutno provést kalibraci, kde bylo zadáno extruderu, aby vysunul určitou délku filamentu s originálním nastavením 150 kroků na mm. Poté byla změřena reálná délka posunu tiskové struny a podle rovnice 6.4 byl dopočítán správný parametr potřebných kroků extruderu na milimetr tiskové struny. Parametr kroků na milimetr určuje, kolik kroků musí firmware odeslat na daný motor, aby posun osy reálně odpovídal jednomu milimetru.

$$nk = \frac{n}{ph} = \frac{3200}{16} = 200 \text{ krok/mm} \quad (6.3)$$

Kde  $nk$  je výsledný počet kroků na milimetr,  $n$  jsou kroky motoru za jednu rotaci a  $ph$  je stoupání závitu.

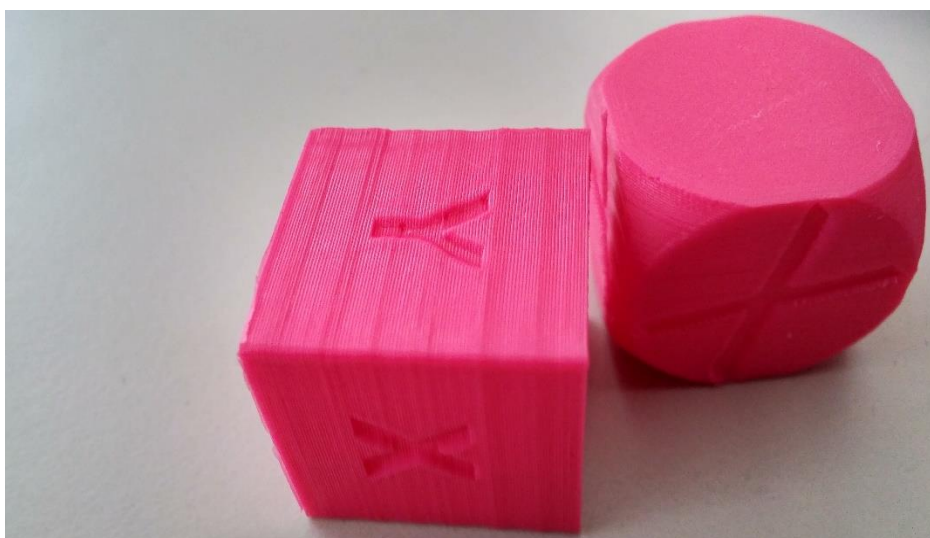


$$nke = \frac{l}{\left(\frac{l_{real}}{n}\right)} = \frac{3}{\left(\frac{4,1}{150}\right)} = 109,75 \text{ krok/mm} \quad (6.4)$$

Kde  $nke$  je výsledný potřebný počet kroků na milimetr extruderu,  $l$  je požadovaná délka extruze,  $l_{real}$  je naměřená délka extruze a  $n$  je aktuální nastavení kroků na milimetr v době měření.

Po těchto prvotních kalibracích následoval testovací tisk. Prvním modelem byla jednoduchá kostka s písmenným označením os o straně 20 mm, na jejíž tisk byl použit plast PLA firmy Plasty Mladeč (růžový). Nastavená akcelerace os X a Y činila 1200 mm/s<sup>2</sup>. Při standardní tiskové rychlosti 60 mm/s a vrstvě tisku 0,2 mm se ukázalo, že proud do motorů nastavený trimrem na drivech TMC2208 je nedostatečný a motory při rychlé změně směru ztrácely kroky. Prvotně nastavený proud 850 mA byl dostaven na 1,2 A, což při dostatečném chlazení je v povolených pracovních mezích driveru. Proud byl měřen multimetrem. Po tomto dostavení pracovního proudu motorů již nebyly zpozorovány ztráty kroků v horizontálních osách a teplota motorů i driverů zůstala na akceptovatelné úrovni. Zejména je třeba kontrolovat, aby teploty motorů nepřesahovaly 80 °C, jelikož pak by docházelo ke změknutí tisknutých PET-G dílů v okolí motoru.

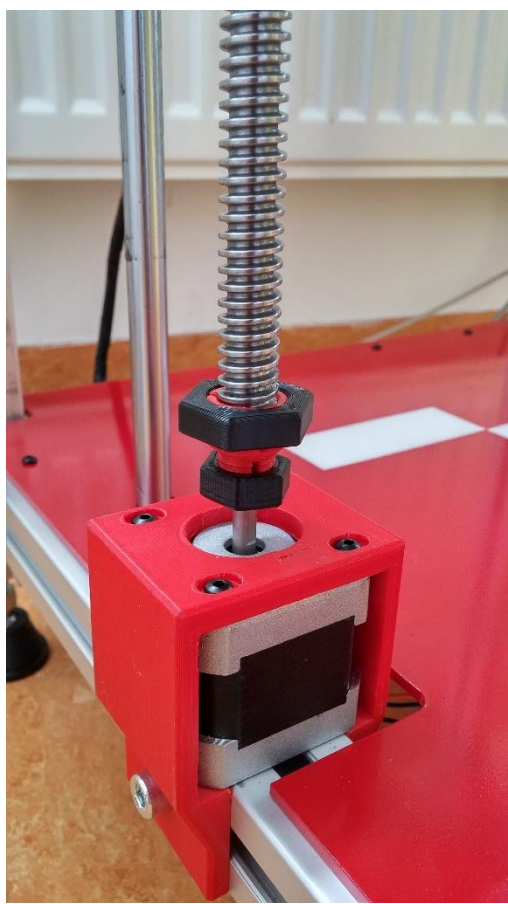
Následující tisk měl být více druhů kostek při různých rychlostech. Všechny výtisky však vykazovaly pravidelné horizontální pruhy (viz. *Obrázek 25*). Tento jev je úkazem špatně se pohybující osy Z. Po inspekci problému bylo zjištěno, že zvolené spojky zajišťující propojení mezi motory a trapézami v ose Z jsou nevhodné (viz. *Obrázek 26*). Při dotažení upnutí trapézové tyče totiž docházelo k vyosení trapézy z linie osy motoru. Toto pozorování bylo potvrzeno uvolněním uchycení Z motorů k rámu, aby se motory mohly volně horizontálně pohybovat, nikoli však rotovat. Motory se pak při posunu osy Z pohybovaly do stran a výkyv trapézy se nepřenášel do tiskové podložky, nýbrž do motorů. Na samotném testovaném zařízení proto tedy byly vytisknuty centrovací spojky motorů s trapézovou tyčí, výkyv trapéz byl snížen a defekty na tisku byly omezeny, ne však úplně odstraněny (viz. *Obrázek 27 a 28*).



*Obrázek 25 - Horizontální defekty na výtisku*



*Obrázek 27 - Nevhodná spojka*



*Obrázek 26 – Tisknutá centrovací spojka*



*Obrázek 28 – Tisk spojek*

Rychlostní limity a rozměrová přesnost při tisku byly zprvu vyzkoušeny opět na kostkách, tentokrát však s PLA plastem firmy Verbatim (červený) při teplotě 210 °C. První kostka byla tištěna z první poloviny na standardní rychlost 50 mm/s, v druhé polovině kostky (naznačeno černým proužkem na kostce, viz. *Obrázek 29*) byla rychlost tisku pomocí LCD rozhraní zvýšena na 100 mm/s. Tato rychlost je již nadstandardní u většiny kartézských FDM 3D tiskáren, jelikož jejich tisk je při podobných rychlostech již znatelně nepřesný. Na výtisku z pojednávaného prototypu však nebyl mezi rychlostmi žádný viditelný, ani měřitelný rozdíl, což naznačuje, že tiskárna zachovává svou tuhost i při vyšších rychlostech. To splňuje předem zadané požadavky na stabilní a rychlý pohybový systém.



*Obrázek 29 - První kostka na testování rychlosti*

Následoval podrobný zátěžový test závislosti přesnosti tisku na rychlosti. Tiskly se kostky o straně 20 mm při rychlostech 50, 100, 150 a 200 mm/s (*Obrázek č. 30*). Akcelerace os byla nastavena na 1200 mm/s<sup>2</sup>, přičemž firmwarem omezená maximální rychlost pohybu činila 250 mm/s. Materiálem bylo PLA při základní teplotě 210 °C. U každé kostky byly posuvným měřítkem změřeny délky všech stran, tedy v ose X, Y a Z a tyto údaje byly vyneseny do následující tabulky č. 5. Každá strana byla měřena třikrát a výsledky byly zprůměrovány, aby se omezila chyba měření. U první kostky tisknuté při 50 mm/s se předpokládalo, že díky nejmenší rychlosti tisku se nedokonalosti tiskárny projeví nejméně. Zároveň 50 mm/s je považována za standardní tiskovou rychlost u FDM 3D tiskáren. Proto byly procentuální odchylky vztaženy právě k první kostce.

Test ukázal, že tiskárna je schopna pracovat dostatečně přesně i při rychlostech několikanásobných oproti standartu FDM 3D tiskáren. U rychlostí 150 mm/s, 200 mm/s a výše se však už příliš neměnila doba tisku, pouze v řádech desítek vteřin. Tiskárna byla totiž na malém prostoru kostky omezena svým nastaveným zrychlením. Zvýšením akcelerace by došlo ke snížení tiskových časů, vznikalo by pak ale více nepřesností vlivem zvýšení rázů v osách X a Y. Současně u těchto dvou kostek se začaly projevovat neduhy tiskové hlavy a extruderu, které nejsou určeny pro tyto rychlosti. Zejména výplň



kostek byla neúplná, protože při vysoké rychlosti extruder typu Bulldog nebyl schopen tlačit dostatečné množství tiskové struny do trysky s malým průměrem a krátkou tavící zónou. Pro zvýšení průtoku plastu byla zvýšena teplota tisku o 10 °C. Průtok se zlepšil a výplň kostek byla kompletní. Výtisky pak byly ale viditelně deformovány v rozích kvůli nedostatečnému času ponechanému pro tuhnutí plastu, než přes něj tryska nanese další vrstvu. Dle měření měly ale strany kostek správnou délku.



Obrázek 30 - Kostky z testu vlivu rychlosti na přesnost

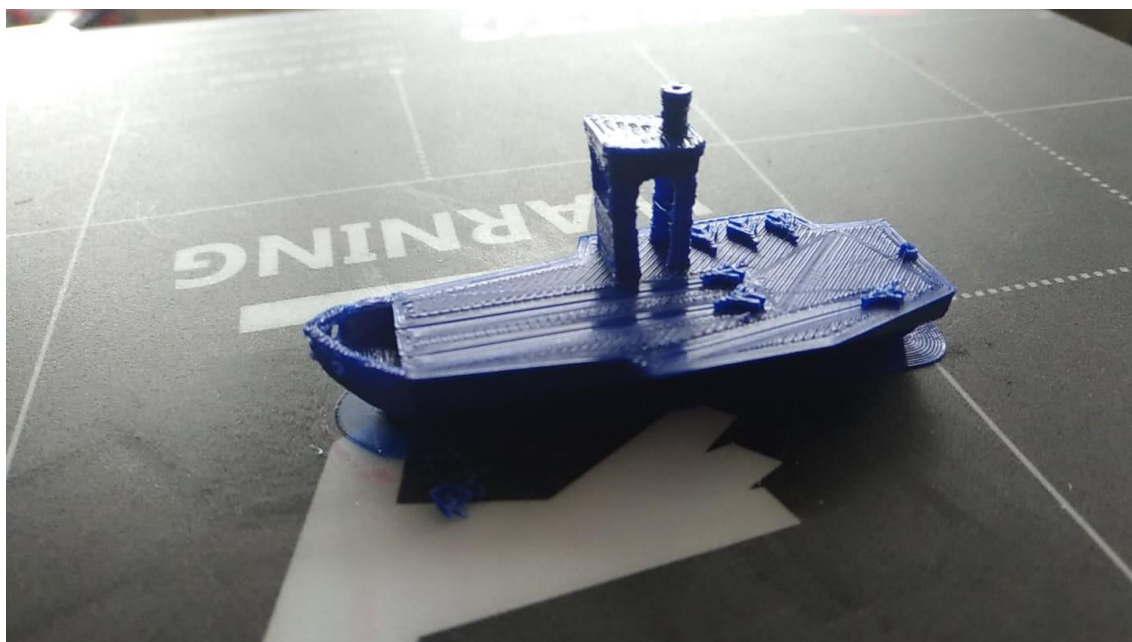
Tabulka 5 – Výsledky testu rychlosti tisku

Rychlost tisku (mm/s)	50	100	150	200
Délka strany X (mm)	19,99	20	19,99	20,03
Délka strany Y (mm)	19,96	20,01	20,01	20,05
Délka strany Z (mm)	20,08	20,08	19,97	19,97
Odchylka X	-	0,0005 %	0,0 %	0,002 %
Odchylka Y	-	0,0025 %	0,0025 %	0,00448 %
Odchylka Z	-	0,0 %	0,00547 %	0,00547 %
Čas tisku	30 minut	25 minut	15 minut	15 minut

Kvalita tisku ve vysokých rychlostech by se dala zlepšit použitím specializovaných extruderů s dvojitým ozubeným podávacím kolem, nebo s převodovkou. Tryska by mohla být vyměněna za větší průměr (tím se ale zhoší vizuální kvalita výtisků) a samotná tisková hlava by mohla být nahrazena typem E3D Volcano, která má delší tavnou zónu než použitý typ V6 a je určena na vysoké průtoky. Právě díky lehce vyměnitelné pracovní hlavě tohoto stroje by tato úprava byla snadná.

Během testu tisků ve vyšších rychlostech se také ukázalo, že přesnost a tuhost horizontálních os má ještě prostor k vylepšení. Kuličkové šrouby byly na obou koncích uchyceny v pouzdrech, které každé obsahují pouze jedno radiální kuličkové ložisko. Toto dovoluje při náhlém rázu v ose vychýlení z pravého úhlu mezi šroubem a jeho ukotvením. Jelikož je ale tisková hlava umístěna blízko středu této nežádané rotace, tak se tento problém na výtiscích neprojevuje nijak viditelně a kvalita tisku při rychlosti přes 100 mm/s je srovnatelná se stroji zaměřenými pouze na FDM 3D tisk pracujících do rychlostí 100 mm/s.

Po testu rychlosti byl vybrán malý model letadlové lodi, jako demonstrátoru funkčnosti zařízení. Model byl tisknut s rychlostí 120 mm/s a i při této rychlosti bylo toto CNC zařízení v konfiguraci tiskárny schopno vytisknout i malé detaily jako letadla na palubě, která mají delku cca 5 mm. Na kabině a špičce trupu se sice projeví defekty díky nedostatečnému chlazení vrstev, podobně jako u kostek, osazené ventilátory jsou ale dost výkonné a kvalita tisku by byla vylepšena spíše lepším nastavením sliceru Cura, ve kterém byl vytvořen gcode pro tento model. Správné vyladění všech parametrů tisku pro co nejvyšší možnou vzhledovou kvalitu je však dlouhodobou a pracnou záležitostí, vyžadující dobrou znalost stroje i použitého softwaru.



*Obrázek 31 - Model letadlové lodi tisknut při 120 mm/s*

## 7. ZÁVĚR

Prostudováním literatury a internetových zdrojů byla vytvořena rešerše shrnující základní historické i technologické informace o 3D tisku a o samotných tiskárnách. Zde bylo zjištěno, že CNC a FDM 3D tiskárny mají společné konstrukční prvky a využitím obou platforem by mohlo vzniknout hybridní zařízení.

Bylo tedy usouzeno, že pokud bude pohybový systém zařízení dostatečně tuhý a výkonný, bude možné sestrojit dle zadání modulární tiskárnu, která by byla schopna vykonávat i více funkcí, než-li jen FDM 3D tisk. Například frézování plošných spojů, vypalování laserem, nanášení pájecích past na plošné spoje atd. Ze získaných poznatků bylo tedy navrženo multifunkční zařízení, které by mohlo vykonávat zmíněné funkce pouhou změnou pracovní hlavy a úpravou řídicího firmwaru.

Využitím technik používaných při stavbě FDM 3D tiskáren bylo sestrojeno CNC zařízení s odnímatelnou tiskovou hlavou, které dosahuje podobné přesnosti jako většina tiskáren na trhu, však při několikanásobně rychlosti tisku. FDM 3D tiskárny pracují v rychlostech 40 – 100 mm/s. Maximální vyzkoušená použitelná rychlost sestaveného stroje při tisku byla stanovena na 200 mm/s, však použitý pohybový systém je schopen vyvinout rychlosti i přes 250 mm/s. Výtisky při takových rychlostech byly shledány rozměrově a vzhledově stále adekvátní. Těchto výkonů bylo dosaženo použitím kvalitních kuličkových šroubů a lineárních vedení HIWIN, které disponují vyšší tuhostí i přesností, než často používané řemenové systémy na 3D tiskárnách.

Aparát tiskárny se ukázal být nad očekávání výkonný, tedy dostatečně výkonný pro širokou škálu možných úkonů. Ve vysokých rychlostech tisku se ale ukázaly limity a problémy navržené konstrukce, zejména v ukotvení kuličkových šroubů na koncích, kde jsou uchyceny pouze do jednoho radiálního ložiska. Uchycení šroubů by se dalo zlepšit nasunutím více ložisek do koncových pouzder a vymezit tak stranový výkyv šroubu oproti pouzdru. Řešením by mohla také být konstrukce z tyčí, která by udržovala konce šroubů vždy proti sobě. Tímto by se ale značně komplikovala konstrukce celého stroje. Také použitá tisková hlava a extruder nejsou určeny pro tak vysoké rychlosti, kterých bylo dosaženo. Zde jediným řešením by byla investice do výkonnější tiskové trysky a silnějšího extruderu. Při rychlostech do 150 mm/s jsou ale osazené komponenty dostačující. Další problém byl objeven na ose Z, kde uchycení motorů k trapézovým tyčím není dokonale souosé a vzniklé kývání tyče při rotaci se přenáší na tiskovou podložku, tedy i výtisk. Použitím centrovacích spojek vytisklých právě na samotném pojednávaném zařízení se problém zmírnil, však nebyl eliminován úplně. Řešením by bylo přesné měření, nalezení a odstranění pravého důvodu výkyvu trapézových tyčí v ose Z.

I přes zmíněné nedokonalosti zařízení předvedlo výborné výkony během tisku, kde zvládlo tisknout model o dostatečné přesnosti při rychlosti několikanásobně oproti běžnému tisku. Díky tomu a díky systému rychle vyměnitelné pracovní hlavy vzniklo multifunkční CNC zařízení s velkým potenciálem pro použití v mnoha oblastech výroby.

# Zdroje

- [1] REDWOOD, Ben. *The Advantages of 3D Printing: Ease of access* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing>
- [2] KRASSENSTEIN, Eddie. You Can Now See the First Ever 3D Printer — Invented by Chuck Hull — In the National Inventors Hall of Fame. In: *3Dprint.com* [online]. 10 Jun 2015 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>
- [3] LONJON, Capucine. *The history of 3d printer: from rapid prototyping to additive fabrication* [online]. 1 Mar 2017 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
- [4] *RepRap project* [online]. 13 October 2018 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/RepRap>
- [5] GRAMES, Emmett. *Fused Deposition Modeling (FDM): 3D Printing Simply Explained* [online]. 31 Aug 2018 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- [6] *Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3* [online]. In: . [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/180-stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3.html?>
- [7] FREY, Scott. *Laser SLA vs DLP vs Masked SLA 3D Printing Technology: Comparing Laser Based SLA, DLP-SLA, & MSLA 3D Printers for Digital Orthodontics* [online]. 23 Mar 2017 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/>
- [8] *The 9 Different Types of 3D Printers: Selective Laser Melting (SLM) Technology* [online]. 23 Mar 2017 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printer-types/>
- [9] *Materiálový slovník* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [10] MOYER, Ian. *Core(X,Y): Theory* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://corexy.com/theory.html>
- [11] Nicolas Rambaud. *3D Modular Systems: Evolutive 3D printers* [online]. [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: <http://doc.3dmodularsystems.com/tmc2100-tmc2130-tmc2208-are-here/>
- [12] NEUFELD, Roxanne, Scott LAHTEINE, Bob KUHN, Chris PEPPER a João BRAZIO. *Marlin 3D Printer Firmware* [online]. In: . [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <http://marlinfw.org/>